



CHANGEMENT CLIMATIQUE, TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET CROISSANCE POTENTIELLE

Gabriel BARATTE
Marie CERVONI
Chloé DEROUEN
Pierre-Louis GIRARD
Romain GREPT

CHANGEMENT CLIMATIQUE, TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET CROISSANCE POTENTIELLE

Ce document de travail n'engage que ses auteurs. L'objet de sa diffusion est de stimuler le débat et d'appeler commentaires et critiques.

Marie Cervoni, Chloé Derouen, Romain Grept et Pierre-Louis Girard sont économistes à la Direction Générale du Trésor au Ministère de l'Économie, des Finances et de la Souveraineté industrielle et numérique (France)

Gabriel Baratte était en stage à la Direction Générale du Trésor au Ministère de l'Économie, des Finances et de la Souveraineté industrielle et numérique (France)

Table des matières

Résumé / Abstract	5
Introduction	6
1. Revue de littérature	9
1.1 Canal du facteur travail	12
1.1.1 Le changement climatique fait peser un risque fort sur l'offre de travail et la productivité du travail	12
1.1.2. Malgré des réallocations d'emplois a priori limitées en nombre au niveau agrégé, l'impact de la transition bas-carbone sur la quantité de travail disponible reste incertain	15
1.2. Canal du facteur capital	18
1.2.1. Le changement climatique implique une dépréciation accélérée du stock de capital productif en France	18
1.2.2. La transition bas-carbone pourrait peser sur l'accumulation de capital du fait de l'échouage d'une partie du stock de capital, et par conséquent sur le niveau de PIB potentiel, mais ce risque peut être atténué en définissant une vision stratégique partagée de la décarbonation pour guider les anticipations	22
1.3. Canal de la productivité globale des facteurs (PGF)	24
1.3.1. L'impact du changement climatique sur la PGF sera négatif, mais son ampleur reste incertaine	24
1.3.2. L'impact des politiques de transition bas-carbone sur la productivité totale des facteurs dépendra notamment de la capacité des innovations vertes à générer des gains de productivité intra-entreprise	27
2. Modèle Mouette	32
2.1 Motivation	32
2.2. Présentation générale du modèle Mouette	34
2.2.1 Ménages	34
2.2.2 Entreprises	37
2.2.2.1 Entreprises productrices du bien générique	37
2.2.2.2 Entreprises productrices de services intermédiaires	39
2.2.2.3 Entreprises de R&D	41
2.2.3 Gouvernement	44
2.2.2 Commerce extérieur	45
2.3 Calibrage et estimation des paramètres	46
2.4 Résultats	46
2.4.1 Comparaison avec le modèle de Henriët, Maggiar et Schubert (2014)	46
2.4.2 Taxe carbone et subvention à la R&D associées à une réduction de l'utilisation d'énergie brute de 85 % en 2050.	47
2.5 Tests de robustesse	49
2.5.1. Instruments de fiscalité utilisés (taxe, subvention à la R&D en efficacité énergétique verte et subvention à la R&D en efficacité énergétique fossile)	49
2.5.2. Élasticité de substitution entre énergies	50
2.5.3. Taux de croissance des progrès techniques énergétiques à l'état stationnaire	51
2.5.4. Stock initial de progrès technique vert	52

3. Méthodologie de quantification de la perte de croissance potentielle induite par les investissements en décarbonation à partir d'une fonction de production	54
3.1 Motivation	54
3.2 Méthodologie	55
3.3 Données et calibrage	58
3.4 Résultats.....	60
3.5 Tests de robustesse : paramètres et sources de données	61
4. Discussion et perspectives	62
4.1 Mise en perspective des résultats	62
4.2 Voies d'amélioration du modèle Mouette	63
4.2.1 Bouclage international	63
4.2.2 Externalités entre secteurs de R&D.....	63
4.2.3 Endogénéisation de la part du PIB dédiée à la R&D	64
4.2.4 Sobriété.....	64
4.3 Limites et pistes d'amélioration de la quantification des effets du surcoût des investissements en décarbonation	65
Annexe 1 : Équations du modèle Mouette en variables intensives	66
Annexe 2 : Calibrage du modèle Mouette	70
1. Élasticités de substitution	70
2. Taux de croissance du progrès technique et part de la recherche allouée aux différents secteurs à l'état stationnaire	70
2. Paramètres fondamentaux	71
3. Quantités d'énergie consommées par les entreprises et les ménages	71
4. Prix et taxes.....	71
5. Paramètres macroéconomiques agrégés	72
6. Actualisation	72
7. Synthèse des paramètres	73
Annexe 3 : Calibrage de la maquette de quantification de la perte de croissance potentielle induite par les investissements en décarbonation	75

Résumé

Le changement climatique et la transition bas-carbone sont susceptibles d'avoir des répercussions sur les déterminants de la croissance potentielle que sont le travail, le capital et la productivité globale des facteurs. Moins son ampleur sera maîtrisée, plus le changement climatique aura un impact négatif significatif sur la croissance potentielle, via ces trois canaux. La transition bas-carbone permet de limiter cet impact négatif, mais ce faisant elle aura aussi un effet sur la croissance potentielle, transitant principalement par la productivité globale des facteurs dans le cas de pays développés comme la France : celle-ci serait réduite à court terme en raison d'une hausse des coûts de production des entreprises liée au renchérissement du prix (explicite ou implicite) du carbone mais aussi d'une réorientation de la recherche et développement en faveur de l'efficacité énergétique et des énergies et procédés bas carbone. Son impact à long terme sur la productivité est plus incertain, dépendant de la capacité des innovations vertes à générer des gains de productivité. Afin d'évaluer les effets de la transition sur la R&D, un nouveau modèle, Mouette, tenant compte des possibilités de réallocation entre trois types de dépenses de R&D (pour améliorer la productivité des secteurs des énergies fossiles, des énergies décarbonées, ou productif) a été développé. La croissance de la productivité ralentirait de 0,15 p.p. par an jusqu'en 2050 en raison de l'éviction de la R&D correspondante, et de 0,2 p.p. au total, en ajoutant l'effet de l'éviction des investissements hors R&D.

Abstract

Climate change and net-zero transition are likely to have repercussions on the determinants of potential growth, namely labour, capital, and total factor productivity. The less its scale is controlled, the more climate change will have a significant negative impact on potential growth through these three channels. The net-zero transition, meanwhile, will mainly affect total factor productivity in advanced economies, including France: this is likely to be reduced in the short term due to an increase in companies' production costs linked to (explicit or implicit) carbon pricing but also a shift in research and development towards energy efficiency and low-carbon energies and processes. The long-term impact on productivity is more uncertain, depending on the ability of green innovations to generate productivity gains. In order to assess the effects of the transition on R&D, a new model, Mouette, has been developed, taking into account the possibilities for reallocation between three types of R&D expenditure (to improve the fossil fuel and decarbonized energy efficiency, or labour productivity). Productivity growth would slow by 0.15 percentage point per year until 2050 due to the crowding out of corresponding R&D, and by 0.2 percentage point in total, adding the effect of the crowding out of non-R&D investments.

Remerciements

Les auteurs remercient particulièrement Fanny Henriet, Nicolas Maggiar et Katheline Schubert pour le partage de leurs codes, leurs retours, et pour leur aide précieuse au développement et au calibrage du modèle, lequel s'inscrit dans le prolongement de leurs travaux.

Introduction

L'augmentation des émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère liées aux activités humaines est à l'origine du changement climatique observé depuis l'ère préindustrielle. Celui-ci se matérialise par un accroissement de la température moyenne globale, ainsi qu'une hausse de la fréquence et de l'intensité d'événements climatiques extrêmes. En l'absence d'inflexion significative dans ces émissions, les températures moyennes pourraient être jusqu'à 4°C supérieures aux températures préindustrielles en France, avec des conséquences délétères potentiellement irréversibles¹. Le changement climatique s'accompagne également d'une dégradation des écosystèmes et des conditions de vie, résultant en partie d'activités humaines qui ne sont pas directement responsables d'émissions de gaz à effet de serre. La transition écologique présente des co-bénéfices permettant d'atténuer ces effets. Les risques associés au changement climatique ont commencé à se matérialiser et s'amplifieront, en touchant l'ensemble des acteurs économiques (ménages, entreprises, administrations publiques et système financier), mais pourront être grandement atténués par la transition vers la neutralité carbone, *a fortiori* si elle est ordonnée et coordonnée au niveau international.

La compréhension et la quantification des effets du changement climatique et des mesures de décarbonation est cruciale pour les décideurs publics : en rendant possible la comparaison des politiques de transition entre elles et par rapport aux dommages qu'elles permettent d'éviter, les évaluations économiques aident à déterminer l'efficacité des mesures mises en œuvre, notamment au vu de leur coût. Ces évaluations doivent également prendre en compte d'autres paramètres pour étudier la pertinence des mesures en faveur de la transition : c'est le principe du « référentiel ABCDE » proposé par la DG Trésor, qui intègre les coûts et le potentiel d'abattement (A), les enjeux de bouclage énergétique (B), la cohérence entre les instruments (C), l'effet déclencheur des politiques publiques (D) et les effets indirects des mesures (E)². Dans cette optique, l'analyse macro-environnementale qui permet de décrire et d'évaluer les effets des mesures de décarbonation sur les différents agrégats économiques (PIB, emploi, consommation, etc.) et sur les émissions de gaz à effet de serre dans un cadre conceptuel cohérent³, a récemment beaucoup progressé⁴.

La transition bas-carbone induit des bénéfices à long terme, en particulier et en premier lieu au regard des effets délétères évités, mais aussi par les gains de productivité des technologies bas-carbone, les moindres importations de combustibles fossiles, et par l'amélioration possible de plusieurs dimensions du bien-être, notamment la santé (dits co-bénéfices). Toutefois, à court et moyen terme, la transition pourrait entraîner un ralentissement de la croissance économique. D'un point de vue macroéconomique, la transition vers la neutralité carbone se traduit par un rehaussement du signal-prix du carbone (explicite ou implicite, que ce soit par de la fiscalité, de la réglementation ou des soutiens) nécessaire pour compenser une externalité négative, qui s'apparente à un double choc négatif d'offre (pour les entreprises en premier lieu via un renchérissement des coûts de production) et de demande (pour les ménages en pesant sur leur pouvoir d'achat), pouvant obérer de manière transitoire la croissance de l'activité. La transition pourrait également impliquer des coûts d'ajustement de l'appareil productif, une dévalorisation du capital (matériel, immatériel et humain) liée aux activités émissives et une orientation des dépenses de recherche et développement (R&D) vers la décarbonation plutôt que vers une R&D plus productive, pénalisant l'activité. En outre, la

¹ Voir Labrousse C., Lancesseur N., Nakaa M. et Valdenaire M. (2020), « [Impact économique du changement climatique : revue des méthodologies d'estimation, résultats et limites](#) », Direction générale du Trésor, *Documents de Travail*, n° 2020/4, DG Trésor (2023) « [Rapport intermédiaire – Les enjeux économiques de la transition vers la neutralité carbone](#) » et DG Trésor (2025) « [Les enjeux économiques de la transition vers la neutralité carbone](#) », *Rapport final*.

² DG Trésor (2025), *op. cit.*

³ Voir Gantois T., Girard P. L. et Le Gall C. (2022), « [Évaluation de l'impact macroéconomique de la transition écologique : revue des modèles macro-environnementaux, usages et limites](#) », Direction générale du Trésor, *Documents de Travail*, n° 2022/2, pour une présentation détaillée de la modélisation macro-environnementale et de différents modèles pouvant être mobilisés pour ce type d'évaluation.

⁴ Voir notamment DG Trésor (2025), « [Rapport final – Les enjeux économiques de la transition vers la neutralité carbone](#) », Pisani-Ferry J. et Mahfouz S. (2023), « [Les incidences économiques de l'action pour le climat – Rapport de synthèse](#) » et NGFS (2024) « [Damage functions, NGFS scenarios, and the economic commitment of climate change](#) ».

combinaison de chocs de demande positifs, liés aux investissements en décarbonation, et d'offre négatifs, décrits ci-dessus, pourrait alimenter l'inflation (production réduite pour une demande plus forte), dont l'évolution dépendra *in fine* de la politique monétaire et des anticipations des ménages. La décarbonation pourrait par ailleurs peser sur les finances publiques en raison de l'augmentation des investissements publics et des mesures d'accompagnement des ménages et entreprises dans leurs efforts de transition⁵. Ainsi, du fait des contraintes qu'elle fait peser sur l'économie et des profondes transformations structurelles qu'elle implique dans un délai contraint, la transition vers la neutralité carbone pourrait avoir un effet négatif, mais modéré, sur l'activité pendant la phase de transition. Si les évaluations macroéconomiques de la transition ont longtemps abouti à des effets positifs en se focalisant sur l'effet demande des investissements nécessaires qui stimulent l'activité et l'emploi, la littérature tient désormais davantage compte des implications de la décarbonation sur l'offre.

Le présent document s'intéresse tout d'abord aux effets du changement climatique et de la transition vers la neutralité carbone sur la croissance potentielle, concept aussi bien mobilisé dans le cadre du diagnostic et des prévisions économiques que dans le pilotage de la politique budgétaire à travers les cycles économiques⁶. Pour ce faire, une revue de la littérature est réalisée en traitant successivement les différents canaux par lesquels ces deux phénomènes peuvent toucher les déterminants de la croissance potentielle, à savoir les facteurs travail et capital, ainsi que la productivité globale des facteurs (PGF). Cette dernière est la part de la croissance qui ne s'explique pas par l'évolution de ces deux facteurs ; ce concept fait le lien avec les enjeux d'innovation et d'allocation efficace des facteurs de production au sein de l'appareil productif. Les effets économiques du changement climatique et de la transition sont classés dans le Tableau 1 selon leur ampleur et leur probabilité de se matérialiser dans l'économie française.

Ce document présente ensuite deux analyses supplémentaires, réalisées à l'aide de modélisations, des effets que la transition vers la neutralité carbone pourrait avoir sur la croissance potentielle en France, 1) via les mécanismes de réallocation des ressources de R&D et 2) via le surcoût que les investissements en décarbonation peuvent représenter pour les entreprises. D'une part, la nécessité de générer des gains d'efficacité énergétique via l'innovation peut avoir un effet d'éviction sur les dépenses de R&D visant à développer ou améliorer des technologies pour accroître le potentiel productif. D'autre part, les mesures d'atténuation visent à inciter les entreprises à investir pour réduire leur consommation énergétique et décarboner leur appareil productif, sans pour autant que ces investissements n'accroissent la production (e.g. la rénovation des bâtiments) ou ne fournissent les mêmes services que les technologies alternatives émissives au moins à court terme (e.g. les hauts-fourneaux décarbonés). Pour analyser ces mécanismes, deux outils spécifiques ont été développés. Le premier est un modèle à croissance endogène, Mouette (MOdèle Utile à l'Évaluation des Trajectoires de Transition Énergétique), dans lequel la R&D et les possibilités de substitution entre énergies carbonées et décarbonées sont modélisées explicitement. Le second outil est une méthodologie de quantification de la perte de croissance potentielle induite par les investissements en décarbonation qui s'appuie sur une fonction de production, c'est-à-dire la formalisation de la relation entre la production, le travail, le capital et la PGF. Ces deux outils permettent de quantifier, pour l'économie française, le ralentissement total de la productivité globale des facteurs auquel la transition bas-carbone pourrait conduire.

⁵ Pisani-Ferry J-F. et Mahfouz S. (2022), « [L'action climatique : un enjeu macroéconomique](#) », France Stratégie, *Note d'analyse*, n° 114.

⁶ Gatier A. et Herlin A. (2017), « [La croissance potentielle en France](#) », Direction générale du Trésor, *Trésor-Éco*, n° 206.

La direction générale du Trésor poursuit ainsi grâce à ces développements sa montée en compétence sur les enjeux de modélisation macroéconomique des politiques de transition bas-carbone, amorcée par la création de la sous-direction Transition écologique (TRECO) en 2023, le développement du module Mésange Vert⁷ en 2024 (permettant d'estimer les effets sur les émissions de gaz à effet de serre des variantes macroéconomiques du modèle Mésange), et la prise en main du modèle macroéconomique vert ThreeME⁸, dans le cadre d'un partenariat avec l'Observatoire Français des Conjonctures Economiques (OFCE) et l'Ademe, et qui permet de mesurer les effets macroéconomiques de politiques de transition environnementales.

⁷ Bouillot M., Girard P.-L. et Tockay N. (2024), « [Présentation du module Mésange Vert](#) », Direction générale du Trésor, *Documents de travail*, n° 2024/4.

⁸ Largier B., Derouen C., Girard P.-L., Grept R., Reynès F., Saumtally A. et Saqueira L. (2026), « [Comparaison des propriétés des modèles macroéconomiques français ThreeME et Mésange](#) », Direction générale du Trésor, *Documents de travail*, n° 2026/1.

1. Revue de littérature

Cette section propose une revue de littérature visant à identifier les principaux canaux par lesquels le changement climatique et la transition bas-carbone ont des répercussions sur la croissance potentielle et la productivité de l'économie française. Elle aborde successivement les différents canaux par lesquels le changement climatique d'une part et les politiques de transition bas-carbone d'autre part, sont susceptibles de toucher le PIB et la croissance potentielle. Dans un premier temps, elle traite de la composante « travail » : disponibilité, stock et productivité horaire. Dans un second temps, elle aborde la composante « capital », par le prisme du stock de capital productif et des flux d'investissements. Enfin la productivité globale des facteurs est étudiée, en s'intéressant à la fois à l'innovation au sein de l'outil productif et à sa capacité à allouer efficacement les facteurs de production.

En effet, le changement climatique pourrait réduire la croissance potentielle selon trois canaux. Le premier est la diminution de la disponibilité et de la productivité de l'offre de travail, et donc du capital humain, du fait de la plus forte volatilité des températures, des événements climatiques extrêmes et/ou de la pollution. Le deuxième est la dégradation prématurée du stock de capital à cause de l'augmentation de la fréquence et de l'amplitude des aléas climatiques, impliquant une baisse du niveau de PIB potentiel mais aussi une baisse de l'investissement productif (par bouclage macroéconomique). Enfin, une partie des facteurs de production seraient mobilisés pour les besoins de reconstruction et d'adaptation, au détriment des domaines les plus productifs. Les hypothèses de destruction créatrice liées aux aléas climatiques demeurent insuffisamment étayées.

Les politiques de décarbonation visent avant tout à limiter le changement climatique et les coûts des dommages qui y sont associés, en lien avec l'engagement de la France à atteindre la neutralité carbone à horizon 2050. Toutefois, par rapport à un contrefactuel sans transition écologique ni prise en compte de leur impact sur le changement climatique, elles pourraient avoir un effet négatif sur la croissance potentielle pendant la phase de transition. Cet effet résulterait d'une hausse des coûts de production et d'une réorientation de la recherche et développement vers l'efficacité énergétique et les technologies vertes. À long terme, l'impact de la transition sur la productivité des entreprises dépendra essentiellement de la capacité des innovations vertes à générer des gains de productivité. En première approche, les coûts associés aux réallocations d'emplois entre secteurs, entreprises et zones d'emplois auraient un impact limité sur la croissance potentielle en France au regard de l'ampleur contenue du choc. Ces coûts pourraient toutefois être rehaussés en cas d'inadéquation de compétences entre emplois détruits et emplois créés. De façon similaire, le risque d'échouage d'une partie du stock de capital apparaît limité dès lors que la transition est ordonnée, hypothèse qui peut toutefois être jugée optimiste compte tenu des nombreuses incertitudes à date sur les politiques qui seront menées et donc sur la capacité du planificateur à donner une visibilité suffisante aux agents économiques.

Il est important de noter que les effets des politiques de transition et du changement climatique ne se matérialiseront pas selon la même temporalité. À court terme, les coûts devraient découler en premier lieu de la transition, du fait des transformations structurelles à réaliser de manière contrainte et rapide. Les effets délétères du changement climatique se matérialisent déjà et accéléreront à moyen/long terme, et ils seront largement conditionnés par les politiques de transition. Si celles-ci sont conduites de manière ordonnée et coordonnée au niveau international, elles permettront de limiter les pertes liées aux risques physiques et d'éviter une baisse conséquente de la croissance potentielle. En raison de la longueur de l'horizon de projection et de la très forte incertitude entourant les prévisions climatiques (non linéarités des effets, points de basculement), les outils économiques demeurent imparfaits pour quantifier les effets du changement climatique. Ils sont toutefois plus pertinents pour évaluer l'impact de la transition bas-carbone, par nature plus économique et dont les effets peuvent être inférés dès la prise des décisions publiques.

Tableau 1 : Synthèse des canaux d'impact du changement climatique et de la transition bas-carbone sur la croissance potentielle en France

Canal/facteur de transmission	Impact sur le potentiel en...	Changement climatique		Transition bas-carbone	
		Mécanisme	Intensité du canal	Mécanisme	Intensité du canal
Travail	Niveau	Réduction chronique de la productivité horaire	--	Inadéquations de compétences entre emplois détruits et créés	-
		Morbidité accrue liée à la multiplication des pandémies	-	Inadéquation géographique entre emplois détruits et créés	-
		Réduction du capital humain	-	Déficit d'attractivité des emplois verts	-
		Migrations climatiques	?	Amélioration des conditions de travail	+
		Réduction du nombre de jours travaillables	-		
Capital	Croissance	Augmentation de la volatilité, de l'incertitude et de la vulnérabilité financière : baisse de l'investissement productif	-	Perte de valeur des actifs financiers sous-jacents	-
				Effet d'éviction de l'investissement bas-carbone sur d'autres investissements	-
	Niveau	Destruction du stock de capital	--	Sous-utilisation du capital productif	-
		Sous-utilisation du capital productif	-	Coût d'installation des actifs bas-carbone	-
		Obsolescence accélérée du stock de capital	-	Obsolescence accélérée du stock de capital	-
		Perte du capital naturel	-	Renouvellement du capital productif	+
Productivité globale des facteurs	Croissance	Processus de destruction créatrice	?	Réorientation de la R&D vers la décarbonation	--
		Détournement des facteurs de production et de la R&D vers la résilience, la reconstruction et l'adaptation	--	Innovations vertes	++
				Réallocation de l'activité vers des entreprises moins émettrices	?
	Niveau	Perte de compétitivité liée à l'intégration dans les chaînes de valeur mondiales	--	Hausse des coûts de production	--
				Dépendances aux énergies fossiles	+
				Dépendances aux matières premières critiques	-

Note de lecture : Le tableau 1 résume les canaux identifiés par lesquels le climat touche le niveau d'activité et la croissance potentiels. Les signes « - », « + » signalent le sens de l'effet attendu (négatif, positif) et la répétition du signe indique l'ampleur de l'effet (un seul signe pour un impact modéré, deux pour un impact fort, trois pour un impact très fort). Un signe « ? » indique un effet incertain.

Encadré 1 : PIB potentiel et croissance potentielle

Le PIB potentiel est défini comme le volume de production de biens et de services que peut atteindre durablement une économie en utilisant pleinement ses capacités, mais sans créer de tensions inflationnistes⁹. De façon générale, le PIB potentiel peut être représenté sous la forme suivante à l'aide d'une fonction de production :

$$PIB_t^* = f(PGF_t^*, L_t^*, K_t^*)$$

Où le symbole * désigne des valeurs potentielles. Le PIB potentiel est ainsi relié à la productivité globale des facteurs (PGF) et aux facteurs travail (L) et capital (K) et la croissance potentielle peut habituellement (i.e. dans le cas d'une fonction de production à élasticités constantes – dite CES) s'écrire sous la forme suivante :

$$pib_t^* = \alpha_1 k_t^* + \alpha_2 l_t^* + \alpha_3 pgf_t^*$$

Où les minuscules désignent des taux de croissance, et les paramètres α des coefficients qui dépendent du choix de la fonction de production.

Selon cette approche, **le PIB potentiel et sa croissance sont fonctions :**

- De la **quantité de travail disponible** (L) qui est elle-même fonction du nombre tendanciel d'heures travaillées par personne, de la population active tendancielle et du chômage structurel¹⁰. Au-delà de cette dimension quantitative du facteur travail (nombre d'heures de travail disponibles), il est possible d'inclure une dimension qualitative dans sa définition avec un indicateur de niveau de capital humain représentant l'ensemble des aptitudes, des talents, des qualifications et des expériences accumulées par les individus.

$$L_t^* = CH_t * POP(15 - 64)_t * TA_t^* * (1 - NAIRU_t) * NBH_t^*$$

Où CH_t est un indicateur de niveau de capital humain, $POP(15 - 64)_t$ la population en âge de travailler, TA_t le taux d'activité, $NAIRU_t$ le taux de chômage structurel et NBH_t le nombre d'heures travaillées par travailleur.

- De la **quantité de capital disponible** (K) qui est constitué de tous les actifs, physiques et intangibles, utilisés dans le processus de production (bâtiments, machines, logiciels, brevets, infrastructures publiques...). Il est traditionnellement construit à l'aide de la méthode de l'inventaire permanent, selon laquelle le stock de capital contemporain (K_t) est égal au stock de la période précédente déprécié, auquel s'ajoute l'investissement (I_t) :

$$K_t = (1 - \delta) K_{t-1} + I_t$$

Où δ représente le taux de dépréciation du capital.

- D'un **résidu appelé « productivité globale des facteurs »** : la productivité globale des facteurs (PGF) est la part de la croissance qui ne s'explique pas par la croissance des services de travail et du capital, et reflète notamment la bonne allocation des facteurs de production, les effets du progrès technique, ou les co-bénéfices de l'investissement public (dans les infrastructures notamment). Le progrès technique interagit avec la PGF au niveau de la frontière technologique mais aussi en fonction de la diffusion de l'innovation dans les systèmes productifs. Le dynamisme économique (entrée et sortie d'entreprises avec des dynamiques de productivité différentes) touche également la productivité globale des facteurs puisqu'elle contribue à l'allocation des facteurs de production.

⁹ Gatier A. et Herlin A. (2017), *op. cit.*

¹⁰ Approximé par le chômage qui permet d'éviter une accélération des coûts salariaux unitaires.

1.1 Canal du facteur travail

1.1.1 Le changement climatique fait peser un risque fort sur l'offre de travail et la productivité du travail

Le changement climatique pourrait tout d'abord conduire à une réduction de l'offre de travail, du fait des événements climatiques extrêmes, de la pollution de l'air¹¹ et des risques sanitaires. À l'échelle individuelle, confrontés à de plus fortes variations des températures¹², ainsi qu'à des pics de pollution de l'air¹³, les travailleurs pourraient choisir ou être contraints de diminuer leurs heures de travail, abaissant ainsi le niveau de PIB potentiel. La possibilité d'une substitution intertemporelle (mais aussi géographique et intersectorielle) des heures de travail réduit cette diminution mais ne serait pas toujours possible, notamment face à la généralisation et l'intensification des épisodes caniculaires attendus en France¹⁴. En croisant la densité de la population et les risques climatiques identifiés comme naturels, l'ONERC estimait ainsi en 2017 que 62 % de la population française était exposée de manière forte ou très forte aux risques climatiques¹⁵. Toutefois, si l'Organisation Internationale du Travail évalue que, d'ici 2030, la force de travail dans le monde diminuerait au moins de 2,2 % à cause de la chaleur, l'Europe du Nord ne serait que peu concernée à cet horizon¹⁶. En revanche, l'augmentation des températures, la déstabilisation des écosystèmes et la pollution conduiraient à une plus grande morbidité¹⁷, par la diffusion de maladies infectieuses et tropicales¹⁸, en France et en Europe occidentale, qui accroîtrait le risque d'immobilisation de la force de travail. Au niveau régional, les catastrophes naturelles dégradent l'offre de travail à court et moyen terme¹⁹.

La productivité des travailleurs, qui inclut le capital humain, risque de diminuer face à l'augmentation généralisée de la température, pesant sur la croissance potentielle, même si le positionnement géographique de la France métropolitaine limiterait ce risque relativement à d'autres régions du monde. Les vagues de chaleur réduisent les performances scolaires (le jour d'un examen ou de manière répétée pendant l'année²⁰) et restreignent ainsi l'accumulation de capital humain. La littérature physiologique établit une relation en « U inversé » entre température et productivité²¹, résultat aussi obtenu en considérant le lien entre l'arbitrage travail/loisirs et la température corporelle des travailleurs (corrélée au degré d'effort et à la température extérieure). En outre, la productivité des travailleurs n'est pas homogène en fonction de la température pour tous les pays, avec un pic de

¹¹ Le changement climatique contribue à aggraver certaines formes de pollution. Par exemple, les vagues de chaleur favorisent la formation d'ozone au niveau du sol, tandis que les incendies de forêt, favorisés par la sécheresse, dégradent la qualité de l'air à cause des fumées.

¹² Zivin J. et Neidell M. (2014), "Temperature and the Allocation of Time: Implications for Climate Change", *Journal of Labor Economics*, Vol. 32, No 1.

¹³ Zivin J. et Neidell M. (2012), "The impact of Pollution on Worker Productivity", *American Economic Review*, Vol. 102, No 7.

¹⁴ Bador M., Terray L., Boé J., Somot S., Alias A., Gibelin, A.-L. et Dubuisson B. (2017), "Future summer mega-heatwave and record-breaking temperatures in a warmer France climate", *Environmental Research Letters*, 12-7.

¹⁵ Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique (2017), « Brochure sur Les Impacts du changement Climatique en France ».

¹⁶ Kjellström T., Maître N., Saget C., Otto M. et Karimova T. (2019), "Working on a warmer planet: The impact of heat stress on labour productivity and decent work". ILO. 2,2 % de la force de travail représente environ 80 % d'ETP et 2 400 Md\$ de PIB en moins en 2030.

¹⁷ 58 % des maladies infectieuses dans le monde ont déjà été aggravées par des aléas climatiques ; Dean J. M., Franklin E. C., Gaw I. M., Knudson T. A., McKenzie T., Mora C., Patz J. A., Setter R. O., Smith C. Z., von Hammerstein H. et Webster K. M. (2022), "Over half of known human pathogenic diseases can be aggravated by climate change", *Nature Climate Change*, Vol. 12, pp. 869-875.

¹⁸ Beyer R., Manica A. et Mora C. (2021), "Shifts in global bat diversity suggest a possible role of climate change in the emergence of SARS-CoV-1 and SARS-CoV-2", *Science of the Total Environment*, Vol 767.

¹⁹ Pour le cas des vagues de chaleur, voir Gonzalez-Torres Fernandez G., Parker M. et Usman S. (2025), "Going NUTS: the regional impact of extreme climate events over the medium term", *European Economic Review* n° 178. Les étés chauds (>1,5°C au-dessus de la moyenne) peuvent entraîner une perte de production locale de 0,5 % la même année, – principalement en raison de la baisse de l'offre de travail – et jusqu'à 1,4 % quatre ans après – en raison d'effets de demande.

²⁰ Park J. (2022), "Hot Temperature and High Stakes Exams: Evidence from New York City Public Schools", *Journal of Human Resources*, Vol. 57 2 Une hausse de 1 °F (soit environ 0,56 °C) le jour de l'examen réduit la performance d'environ 0,8 % d'un écart-type.

²¹ Heal G. et Park J. (2016), "Temperature Stress and the Direct Impact of Climate Change: A Review of an Emerging Literature", *Review of Environmental Economics and Policy*, Vol. 10, No 2, pp. 1-17.

productivité du travail à une température annuelle moyenne de 13,6°C et un fort déclin à des températures extrêmes²². La littérature micro-économétrique et les expériences en laboratoire²³ démontrent une relation décroissante et non linéaire entre température et productivité du travail dans des tâches physiques (agriculture, usines) mais aussi intellectuelles (en bureau, en banque, en centre d'appels, à l'école, notamment à cause de la pénibilité et de la fatigue mentale), pour lesquelles il y aurait une perte de productivité de 2 %/°C au-delà de 25°C²⁴. La France serait relativement moins exposée du fait de sa position géographique, mais l'incertitude des estimations concernant les régions dites froides, auxquelles la France est rattachée, est plus importante qu'ailleurs²⁵. Une nouvelle étude de 2021²⁶ évalue à -0,2 % la baisse du PIB français en 2050 liée à l'impact de l'augmentation des températures sur la productivité. Néanmoins, les études actuelles sous-estiment potentiellement l'impact du changement climatique pour la France : elles considèrent généralement que la France serait moins exposée que le reste du monde alors que l'augmentation de la température moyenne a déjà dépassé 1,9°C en France (plus élevé que le réchauffement moyen des terres émergées)²⁷, et pourrait être d'au moins 4°C²⁸ à horizon 2100. Une étude micro-économétrique de 2024 sur données européennes montre qu'une canicule de dix jours réduit ainsi la productivité du travail annuelle d'une entreprise d'environ 0,3 %²⁹. Plus les entreprises sont grandes, disposent de capacités de financement importantes, et ont été exposées par le passé à des canicules, moindre est leur perte de productivité. À l'inverse, plus la vague de chaleur est longue et intense, plus la perte de productivité est forte. Enfin, les pics de pollution, ainsi que la diffusion des maladies infectieuses, risquent de réduire le capital humain des travailleurs en altérant leurs capacités physiques et/ou cognitives³⁰.

L'altération des capacités cognitives et physiques des travailleurs liée à la chaleur a déjà un coût économique dont la quantification pour la France se précise³¹. À l'échelle européenne³² les vagues de chaleur survenues au cours des années anormalement chaudes (2003, 2010, 2015, 2018) auraient ainsi entraîné une baisse de l'activité allant de 0,3 pt à 0,5 pt du PIB européen. Les économies des régions du Sud sont toujours les plus touchées (pertes toujours supérieures à 1 pt de PIB) par rapport au pays d'Europe continentale et du Nord. Ces régions du Sud sont celles qui présentent globalement une structure économique plus exposée aux conditions météorologiques avec une fraction importante d'activités exercées en extérieur. D'ici 2060, les impacts des vagues de chaleur, qui se traduiraient par une baisse de la productivité du travail, pourraient être multipliés par près de cinq en Europe par rapport à la période 1981-2010 si aucune mesure d'atténuation ou d'adaptation n'était prise. Quant à la France, si les pertes économiques enregistrées restent en moyenne plus faibles que celles des pays d'Europe du Sud, les

²² Burke M., Hsiang S. et Miguel E. (2015), "Global non-linear effect of temperature on economic production", *Nature* 527, 235–239.

²³ Dell M., Jones B. et Olken A. (2012), "[Temperature Shocks and Economic Growth: Evidence from the Last Half Century](#)", *American Economic Journal: Macroeconomics*, 4 (3): 66-95.

²⁴ Seppänen O., Fisk W.J. et Faulkner D. (2004), "Control of temperature for health and productivity in offices", Lawrence Berkeley National Laboratory.

²⁵ Burke et al. (2015), *op. cit.*

²⁶ Szewczyk W., Mongelli I. et Ciscas J.-C. (2021), "Heat stress, labour productivity and adaptation in Europe – a regional and occupational analysis", *Environmental Research Letters* 16(10).

²⁷ Météo-France : comparaison entre les périodes 2013-2022 et 1850-1900.

²⁸ Scénarios NGFS RCP 7.0 et 8.5. Le NGFS est un réseau de banques centrales et superviseurs financiers constitué pour développer la finance verte.

²⁹ Costa H., Franco G., Unsal F., Mudigonda S. et Caldas M. P. (2024), "The heat is on: Heat stress, productivity and adaptation among firms", OCDE, *Working Papers*, n° 1828. Cette étude est menée avec la base de données Orbis, sur 2,7 millions d'entreprises entre 2000 et 2021. Elle retient deux caractérisations des canicules : un nombre de jours consécutifs où le thermostat dépasse un niveau absolu (30°C, 35°C et 40°C), ou un niveau relatif dépendant de l'historique des températures locales.

³⁰ Baratgin L., Eupherte A. et Taconet N. (2026), « [Pollution de l'air : au-delà des effets sanitaires des répercussions économiques importantes](#) », Direction générale du Trésor, *Trésor-Éco*, n° 380.

³¹ Voir Benhamou S. et Flamand J. (2023), « Le travail à l'épreuve du changement climatique », France Stratégie, *Note d'analyse*, n° 123.

³² Garcia-Léon D., Casanueva A., Standardi G., Burgstall A., Flouris A. D. et Nybo L. (2021), "Current and projected regional economic impacts of heatwaves in Europe", *Nature Communications*. La modélisation est réalisée à partir de chocs négatifs de productivité du travail (calibrés sur données météo et des indices d'exposition aux vagues de chaleur) dans un modèle d'équilibre général calculable. L'évaluation ne tient compte que des canaux suivants, capital humain et productivité.

projections climatiques à horizon 2055-2064 montrent une baisse de l'activité d'environ 1,5 pt de PIB (contre environ 0,3 pt en moyenne sur la période 1981-2010) à structure sectorielle inchangée.

Le déterminant principal de l'évolution de l'offre du travail et de sa productivité face au changement climatique résidera dans l'adaptation des travailleurs et des entreprises. En particulier, les investissements des administrations publiques, des ménages et des entreprises dans l'adaptation face aux chaleurs extrêmes permettront de réduire nettement l'impact de la température sur la mortalité³³ et sur la productivité³⁴ (par exemple avec l'isolation thermique, les occultations solaires, le soutien mécanique aux travailleurs, l'automatisation de certaines tâches et dans certains cas la climatisation). Leur déploiement dépendra toutefois des contraintes financières (selon la capacité des agents économiques à investir dans l'adaptation) et techniques (selon la capacité de l'offre à répondre à la demande de telles technologies)³⁵, alors que ces investissements impliquent une augmentation de la demande énergétique et des coûts de production, ainsi que des rigidités organisationnelles³⁶. Par ailleurs, certaines activités, en premier lieu en extérieur, ne pourront pas être protégées par ce type d'investissements et l'adaptation reposera partiellement sur les capacités de substitution intertemporelle de la charge de travail (au cours de la journée, mais aussi de l'année). De manière plus localisée, les effets négatifs des vagues de chaleur sur l'accumulation de capital humain sont atténués par la présence de systèmes de climatisation dans les écoles³⁷, actuellement peu déployés en France³⁸.

Le changement climatique implique enfin une modification des flux migratoires, dont l'impact sur le PIB et la croissance potentiels est indéterminé. L'impact hétérogène du changement climatique selon les zones géographiques peut pousser les populations les plus touchées à répondre par la migration vers les régions les plus productives³⁹. Par exemple, les variations de température et de précipitation au Mexique, impliquant de plus mauvaises récoltes et donc des pertes de revenus, se traduisent par une augmentation de la migration vers les États-Unis⁴⁰, dynamiques qui se constatent également à l'intérieur des États-Unis du fait du changement climatique⁴¹. Le changement climatique est un facteur d'exacerbation des conflits, notamment face à la raréfaction des ressources, l'accès à l'eau et les inondations, et donc de migrations « climatiques »⁴². Si une augmentation de l'offre de travail (rendue possible par le positionnement relativement plus clément du climat français) peut améliorer le niveau de PIB potentiel, des effets de composition et des coûts d'adaptation rendent l'impact des migrations climatiques sur la productivité du travail incertain. Au niveau infranational, la population active peut augmenter localement après une catastrophe naturelle pour répondre aux besoins de la reconstruction, mais la population inactive (notamment retraitée) peut diminuer⁴³. L'effet négatif des catastrophes naturelles sur la population active

³³ Barreca A., Clay K., Deschenes O., Greenstone M. et Shapiro J. S. (2016), "Adapting to Climate Change: The Remarkable Decline in the US Temperature-Mortality Relationship over the Twentieth Century", *JPE* 124, no. 1, 105–159.

³⁴ Voir Hoffman C. (2019), "Estimating the benefits of adaptation to extreme climate events, focusing on nonmarket damages", *Ecological Economics*, n° 164 et Ciscar J. C., Mongelli I. et Szewczyk W. (2021), "Heat stress, labour productivity and adaptation in Europe – a regional and occupational analysis", *Environmental Research Letters*, Volume 16.

³⁵ Comme pour les contraintes financières et techniques à la généralisation du chauffage aujourd'hui.

³⁶ Les rigidités organisationnelles désignent les caractéristiques d'une organisation qui limitent sa capacité à anticiper, intégrer et mettre en œuvre les mesures d'adaptation nécessaires (par exemple, la difficulté à mettre en place du télétravail ou à adapter les plages horaires de travail).

³⁷ Park et al. (2022) *op.cit.*

³⁸ 7 % de la surface des établissements d'enseignement était équipée de climatisation en 2020. Source : CODA Stratégies.

³⁹ Black R., Bennett S., Thomas S. et Beddington J. R. (2011), "Migration as adaptation", *Nature* 478, 447–449.

⁴⁰ Feng S., Krueger A. B. et Oppenheimer M. (2010), "Linkages among climate change, crop yields and Mexico's cross-border migration", *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107(32): 14257-14262.

⁴¹ Feng S., Oppenheimer M. et Schlenker W. (2012), "Climate change, Crop Yields, and Internal Migration in the United States", *WP* 17734, NBER.

⁴² Owain E. L. et Maslin M.A. (2018), "Assessing the relative contribution of economic, political and environmental factors on past conflict and the displacement of people in East Africa", *Palgrave Commun* 4, 47.

⁴³ Gonzalez-Torres et al. (2025), *op. cit.*

dominerait plutôt⁴⁴. En Europe, les flux migratoires (dans leur ensemble) pourraient favoriser l'emploi des travailleurs natifs par effet de complémentarité, et soutiendraient l'innovation et la productivité⁴⁵.

Toutefois, le changement climatique n'entraînerait pas mécaniquement davantage de mobilité. La littérature fait état d'un lien de causalité en moyenne positif à ce sujet, mais une partie non négligeable d'études empiriques constate des effets non significatifs voire négatifs⁴⁶. L'IDMC⁴⁷ estime que les migrations internes induites par les catastrophes climatiques fluctuent autour de 23 millions par an depuis 2008 (constituant *a priori* une borne basse au vu de la définition retenue centrée sur les déplacements internes) mais présentent un taux de retour très élevé après plusieurs années (98 %). Les flux d'émigration mondiaux pourraient augmenter pour atteindre 110 millions en 2060, contre 135 millions dans le cas d'une augmentation des émissions à leur rythme actuel⁴⁸. Toutefois, l'adoption de mesures d'adaptation à l'échelle mondiale permettrait de réduire de 80 % les flux mondiaux de mobilité climatique par rapport à ce scénario climatique et économique central.

1.1.2. *Malgré des réallocations d'emplois a priori limitées en nombre au niveau agrégé, l'impact de la transition bas-carbone sur la quantité de travail disponible reste incertain*

Les politiques de transition bas-carbone impliquent une transformation structurelle de l'économie, susceptible de donner lieu à des réallocations d'emplois. Toutefois, les emplois concernés représenteraient une faible part de l'emploi total en France. S'agissant des emplois bruns (emplois dans les activités brunes et professions brunes dans les activités vertes et neutres), leur part dans l'emploi total serait de l'ordre de 9,2 % en France en 2021 mais tous ne sont pas exposés à un fort risque de transition, d'après une taxonomie développée par la DG Trésor⁴⁹. En effet, seuls 3 % peuvent être considérés comme particulièrement exposés : ce sont les professions brunes au sein des activités polluantes, qui sont concentrées dans les filières industrielles liées aux produits fossiles (secteur automobile, métallurgie, transport routier et aérien, extraction et cokéfaction-raffinage). Les professions brunes au sein des activités vertes et neutres ne représentaient qu'1 % de l'emploi salarié en 2021 et seraient davantage concernées par une transformation des tâches et compétences que par une réduction de leurs effectifs, tandis que les professions vertes et verdissantes dans les activités brunes (0,9 % de l'emploi salarié en 2021) et les professions neutres dans les activités brunes (4,3 % de l'emploi salarié) devraient disposer de possibilités de transition vers d'autres activités. Selon cette même taxonomie, 12 % des salariés occupaient un emploi vert en 2021 en exerçant soit une profession verte ou verdissante dans des activités vertes ou neutres, soit une profession neutre dans une activité verte. 79 % des salariés occupaient des emplois neutres (professions neutres dans des activités neutres). Par ailleurs, la forte hétérogénéité d'intensité d'émissions de gaz à effet de serre entre les entreprises d'un même secteur conduirait à des réallocations intrasectorielles plus importantes que intersectorielles⁵⁰.

⁴⁴ Deryugina T. (2020), "Economic effects of natural disasters", *IZA World of Labor* 2022: 493.

⁴⁵ Batut C., Gantois T., Lavallée J. (2024), « [La mobilité intra-européenne des personnes](#) », Direction générale du Trésor, *Trésor-Éco*, n° 337.

⁴⁶ Beine M. et Jensen L. (2021), "A meta-analysis of the literature on climate change and migration", *Journal of Demographic Economics* 87(2), 293-344.

⁴⁷ Internal Displacement Monitoring Center.

⁴⁸ Cattaneo C., Dasgupta S., Farinoso F. et Massetti E. (2024), "Climate variability and worldwide migration: Current Evidence and Projections", *Environmental Research Letters*. Ces estimations disposent d'un très large intervalle de confiance et dépendent fortement des scénarios climatiques et d'adaptation retenus. Ces scénarios ne tiennent toutefois pas compte du rôle joué par d'autres variables dans les décisions de mobilité (technologie, facteurs socio-économiques et institutionnels, etc.).

⁴⁹ DG Trésor (2025), « [Les enjeux économiques de la transition vers la neutralité carbone](#) », *Rapport final, chapitre 7*. Cette taxonomie catégorise les emplois selon deux critères : (i) les biens et services produits par l'entreprise (activité verte, neutre ou brune selon son effet direct et indirect sur la transition) et (ii) la profession exercée au sein de l'entreprise (profession verte, neutre ou brune, selon la contribution l'impact de l'entreprise sur l'environnement et sur leur consommation de ressources). Si la finalité de la profession au sein de l'entreprise est directement environnementale, on parle de profession verte. Si l'évolution des tâches et compétences associées à la fonction permet de mieux tenir compte des enjeux de transition on parle de profession verdissante (par exemple, les architectes).

⁵⁰ Fontaine F., Ollivier H., Saussay A. et Schubert K. (2023), « Transition énergétique : faut-il craindre pour l'emploi ? », Conseil d'analyse économique, *Note*, n° 80.

Ces réallocations directes d'emplois générées par les politiques de transition auraient un impact limité sur l'emploi au niveau agrégé en France, au regard des réallocations d'emplois observées dans le passé, comme le montrent les évaluations d'impact disponibles. Les travaux économétriques montrent que les politiques de transition bas-carbone ont un impact limité sur l'emploi agrégé⁵¹ à court terme, dépendant de la composition de l'économie en cas de resserrement des politiques environnementales (effet net positif dans le cas de politiques de marché et négatif dans le cas de politiques de réglementation), et qui disparaît à long terme⁵². Les évaluations macroéconomiques concluent également à un impact contenu sur l'emploi agrégé, qui s'accompagnerait de fortes variations sectorielles, mais les modèles mobilisés ne sont pas en mesure d'étudier les réallocations intrasectorielles. Une évaluation⁵³ *ex ante* de l'impact macroéconomique de la transition bas-carbone réalisée par l'Ademe, la Banque de France, le Cired et Seureco-Erasme, où chaque institution a mobilisé son (ou ses) modèle(s), conclut également à une faible variation de l'emploi agrégé⁵⁴, dans le cadre d'une transition ordonnée, avec de fortes variations intersectorielles, de -60 % (e.g. pour les industries pétrolières) à +15 % (e.g. pour la production d'électricité) de l'emploi du secteur par rapport à un scénario sans transition. Enfin, des estimations du FMI⁵⁵, sur la base d'un modèle stylisé dans lequel les productions de biens verts et bruns dépendent de tâches spécifiques, calibré pour un pays développé représentatif, suggèrent que les réallocations découlant d'un ensemble de mesures visant à atteindre la neutralité carbone d'ici 2050 ne représenteraient que 1 % de la main-d'œuvre au cours des dix prochaines années. Ce changement de répartition de main-d'œuvre serait donc moins rapide que les réallocations d'emplois de l'industrie vers les services observées depuis le milieu des années 1980 du fait de changements organisationnels privés et technologiques qui ont touché près de 4 % des emplois par décennie dans les pays développés.

Les risques d'inadéquation de compétences entre les emplois créés par la transition bas-carbone et les travailleurs disponibles, pouvant ralentir la réallocation de l'emploi et le niveau du PIB potentiel, sont difficiles à estimer. Certaines études tendent à montrer que les professions vertes sont systématiquement plus exigeantes en matière de compétences que les professions neutres⁵⁶. L'écart de compétences porte à la fois sur les marges extensive (panel plus large de compétences) et intensive (compétences plus développées), avec de fortes hétérogénéités selon les professions et selon les secteurs⁵⁷. Une analyse sur la France suggère que, bien que les postes verts n'exigent pas nécessairement un niveau d'études plus élevé que les autres postes, une plus grande proportion de postes verts ciblerait les ouvriers qualifiés ou spécialisés⁵⁸. En outre, des travaux du FMI⁵⁹ pour la France indiquent une faible similitude entre les professions brunes et le reste des emplois en matière de compétences, connaissances, tâches, nature du travail, éducation et expérience : le nombre médian de possibilités de transition d'une profession brune vers une profession verte ou neutre serait ainsi plus faible (avec des hétérogénéités entre métiers) qu'entre professions vertes (qui sont plus diversifiées) ou d'une profession

⁵¹ Fontaine *et al.*, (2023), *op. cit.* montrent par exemple, sur la base de données d'entreprises, que l'instauration d'une taxe sur le carbone de 100 €/tCO₂ en France conduirait à des réallocations d'emplois intrasectorielles, calculées comme la somme des destructions et créations d'emplois, de l'ordre de 4 % de l'emploi total en France, contre un taux de réallocation annuel de l'emploi dans le secteur marchand d'à un peu plus de 20 % sur la période 2010-2020.

⁵² Mohommad A. (2021), "Employment effects of environmental policies – evidence from firm-level data", FMI, *Working Papers*, n° 21/140.

⁵³ Callonnec G., Garnero M., Jacquetin F. (Ademe), Allen T., Dées S., de Gaye A., Lisack N. (Banque de France), Couix Q., Dang W., Gherzi F. (CIREN), Boitier B., Le Mouél P. et Zagamé P. (Seureco) (2023), « Risques de transition : une analyse multi-modèles pour la France. Étude comparée de l'implémentation des scénarios du NGFS », Rapport final.

⁵⁴ L'impact sur l'emploi peut être positif ou négatif selon les caractéristiques des modèles. Les modèles keynésiens ThreeME, utilisé par l'Ademe, et Nemesis, de Seureco-Erasme, qui ne tiennent pas compte de coûts d'ajustement dans la réallocation des facteurs de production ou d'effet d'éviction, concluent à un impact positif. À l'inverse, les modèles NiGEM, mobilisé par la Banque de France, et Imacim, du Cired, mettent en avant un impact négatif, du fait de la modélisation d'une règle de Taylor et d'effet d'éviction respectivement.

⁵⁵ FMI (2022), "A greener labor market: employment, policies and economic transformation", World Economic Outlook, Chapitre 3.

⁵⁶ Vona F., Marin G., Consoli D. et Popp D. (2017), "Environmental regulation and green skills: an empirical exploration", J. Assoc. Environ. Resour. Econ.

⁵⁷ Saussay A., Sato M., Vona F. et O'Kane L. (2022), "Who's fit for the low-carbon transition? Emerging skills and wage gaps in job ad data", Centre for Climate Change Economics and Policy, *Working Papers*, n° 30645.

⁵⁸ Fontaine *et al.*, (2023), *op. cit.*

⁵⁹ FMI (2022), "France: Selected Issue", Country Report n° 22/19.

neutre vers une profession verte. Enfin, les professions brunes feraient face à plus d'obstacles que les professions vertes dans l'adoption des nouveaux modes de travail apparus lors de la pandémie de Covid-19, ce qui pourrait limiter les possibilités de transition des travailleurs, en l'absence de formation adéquate. En effet, les professions vertes peuvent être plus facilement automatisés et sont davantage télétravaillables que les professions brunes⁶⁰.

Au-delà des compétences, certaines barrières telles que la faible mobilité géographique des travailleurs peuvent contraindre la réallocation de la main-d'œuvre au sein du territoire en cas de correspondance géographique limitée entre emplois bruns déclinants et emplois verts émergents⁶¹. Le poids dans l'emploi des secteurs les plus émetteurs de gaz à effet de serre varie fortement d'une zone d'emploi à l'autre en France (de 5 % à 25 %⁶²) conduisant à d'importantes hétérogénéités dans les destructions d'emplois engendrées par la transition bas-carbone. En France, les activités vertes sont réparties de façon homogène sur le territoire, mais les activités brunes sont très concentrées dans certaines zones d'emploi⁶³. Les zones rurales se caractérisent quant à elles par une surreprésentation des activités brunes⁶⁴. Dans certaines régions où les emplois bruns représentent une importante part de l'emploi total, l'échouage de capital humain pourrait être conséquent. Symétriquement, des difficultés de recrutement pourraient apparaître ou s'accroître dans des régions enregistrant d'importantes créations nettes d'emplois. En l'absence de réallocations territoriales, le chômage structurel pourrait donc augmenter.

D'éventuels effets sur les salaires pourraient influencer la participation des ménages au marché du travail et donc modifier la taille de la population active, touchant le niveau de PIB potentiel. Le salaire moyen pourrait augmenter au niveau agrégé si les emplois créés sont mieux rémunérés que les emplois détruits. Toutefois, les données récentes apportent des enseignements nuancés sur une prime de salaire des emplois verts par rapport aux autres emplois : les emplois à faible intensité d'émission sont surreprésentés dans des secteurs plus rémunérateurs impliquant un salaire moyen plus élevé pour ces emplois que pour les emplois bruns, mais, au sein d'une même profession et indépendamment du niveau de qualification, aucune « prime verte » ne serait observée⁶⁵. La « prime verte » serait même devenue non significative au cours de la dernière décennie aux États-Unis et au Royaume-Uni, sans pour autant que les causes n'aient été clairement déterminées⁶⁶. La réplique par la DG Trésor de ces travaux sur données françaises aboutit à un résultat similaire. En 2021, la rémunération moyenne d'un salarié d'une activité verte serait 3,6 % supérieure à celle d'un salarié d'une activité neutre présentant les mêmes caractéristiques, soit un écart plus faible que dans le passé (plus de 4 % entre 2010 et 2015) et plus faible que le différentiel de rémunération entre un salarié d'une activité brune et un salarié d'une activité neutre (environ 5 %)⁶⁷. Cette absence de compensation salariale pour des compétences recherchées sinon plus élevées, du moins différentes, par rapport à des offres pour des emplois bruns et/ou gris est susceptible de conduire à un déficit d'attractivité pour les métiers verts et verdissants et pourrait décourager certains travailleurs de participer au marché du travail, ou limiter les réallocations d'emploi, contraignant la quantité de travail disponible. De surcroît, une étude sur données françaises montre que les travailleurs occupants des emplois verts ou verdissants sont plus exposés à des facteurs de pénibilité que les autres salariés présentant des caractéristiques identiques (exposition aux vibrations mécaniques, aux bruits nocifs ou aux agents cancérigènes)⁶⁸, alors que ces expositions ne donnent pas systématiquement lieu à une compensation salariale⁶⁹. La faible attractivité des emplois verts freine les recrutements d'emplois verts

⁶⁰ FMI (2022), *op. cit.*

⁶¹ Saussay *et al.* (2022), *op. cit.*

⁶² DG Trésor (2025), *op. cit.* Chapitre 7.

⁶³ DG Trésor (2025), *op. cit.* Chapitre 7.

⁶⁴ Insee (2021), « Les territoires au cœur des crises, des disparités et des enjeux de développement durable ».

⁶⁵ Fontaine *et al.*, (2023), *op. cit.*

⁶⁶ Sato M., Cass L., Saussay M., Vona F., Mercer L. et O'Kane L. (2023), "Skills and wage gaps in the low-carbon transition: comparing job vacancy data from the US and the UK", Policy report.

⁶⁷ DG Trésor (2025), *op. cit.* Chapitre 7.

⁶⁸ Bayart C., Havet N. et Penot A. (2023), « La pénibilité au travail dans les professions de l'économie verte », Dares, *Revue travail et emplois*.

⁶⁹ Erb L. A. (2024), « Les expositions à des conditions de travail pénibles sont-elles compensées monétairement ? Une analyse dans le cas de la France entre 1991 et 2019 », Dares, *Document d'études*, 278.

dont la demande augmente rapidement. Cette dernière fait déjà face à de fortes tensions de recrutement : en 2022, les entreprises indiquaient que 66 % des projets de recrutement au sein des professions vertes se heurtaient à des tensions⁷⁰. Si le déficit d'offre de travail par rapport à la demande persistait, les employeurs pourraient néanmoins augmenter les salaires des emplois verts pour limiter les pénuries de main-d'œuvre.

Par ailleurs, les politiques de transition bas-carbone, si elles sont bien conçues, pourraient générer des co-bénéfices avec des effets positifs sur l'offre de travail et la productivité des travailleurs. Au vu des impacts néfastes du changement climatique sur la productivité du travail (températures extrêmes, pollution de l'air, maladies...), les politiques de transition bas-carbone sont susceptibles d'avoir des effets positifs sur la santé, la productivité du travail et donc la croissance potentielle. Par exemple, en améliorant la qualité de l'air, la neutralité carbone a le potentiel d'éviter des décès prématurés causés par la pollution de l'air : dans les scénarios « Fit for 55 », la Commission européenne estime ainsi l'évitement de 17 000 décès prématurés par an en France⁷¹. Une autre étude observe une relation négative et significative entre la pollution de l'air et la croissance de la productivité apparente des travailleurs sur des données d'entreprises : sous l'hypothèse (forte) que ces résultats observés au niveau microéconomique seraient valides au niveau macroéconomique, un tiers de la croissance de la productivité du travail en Europe entre 2011 et 2022 pourrait être attribuée à l'amélioration de la qualité de l'air⁷². Ensuite, il est possible que la rénovation énergétique des bâtiments conduise à des gains de productivité du travail, mais leur ampleur est incertaine. Une étude empirique sur des données d'enquête auprès d'entreprises européennes met en évidence une relation positive causale entre les investissements des entreprises dans l'efficacité énergétique et la productivité des travailleurs⁷³ qui peut s'expliquer par un plus grand confort des travailleurs (températures modérées, humidité faible, amélioration de la qualité de l'air), bénéfique à leur productivité⁷⁴. Ce résultat se démarque de la littérature sur le logement qui n'identifie pas de gains phoniques, de qualité de l'air et de confort d'été systématiques⁷⁵ induits par l'isolation des logements. En revanche, la rénovation énergétique des logements des plus modestes réduirait les pathologies cardiaques et respiratoires associées à la précarité énergétique⁷⁶.

1.2. Canal du facteur capital

1.2.1. Le changement climatique implique une dépréciation accélérée du stock de capital productif en France

Le changement climatique se caractérise à la fois par une intensification et une augmentation de la fréquence des événements climatiques extrêmes, qui détruisent directement le capital (biens et infrastructures). I4CE⁷⁷ estime qu'entre 2001 et 2021 plus de 2 000 événements naturels dommageables ont eu lieu en France, dont le coût des dommages assurés est estimé à 0,1 pt de PIB par an. La caisse centrale de réassurance (CCR) a utilisé les scénarios RCP 8.5 et RCP 4.5 du GIEC pour estimer

⁷⁰ SDES (2023), « Des difficultés de recrutement persistent en 2022 dans le secteur de l'économie verte ».

⁷¹ Commission européenne (2021), "Policy scenarios for delivering the European Green Deal".

⁷² Dechezleprêtre A. et Vienne V. (2025), "The impact of Air Pollution labour productivity Productivity", OCDE, *Working Papers*, n° 2025/14. Ce résultat est une extrapolation au niveau macroéconomique de l'analyse microéconométrique conduite sur 2,3 millions d'entreprises (base de données Orbis), déterminant qu'une hausse de la concentration des PM 2.5 de 1 1 µg/m³ (soit 7 % d'augmentation par rapport à la moyenne de l'échantillon) réduirait la valeur ajoutée par travailleur de 0,55 % la même année.

⁷³ Kalantzis F. et Niczyporuk H (2021), "Can European businesses achieve productivity gains from investments in energy efficiency?", Banque européenne d'investissement.

⁷⁴ Allen G. J., MacNaughton P., Satish U., Vallarino J. et Spengler J. D (2016), "Associations of Cognitive Function Scores with Carbon Dioxide, Ventilation, and Volatile Organic Compound Exposures in Office Workers: A Controlled Exposure Study of Green and Conventional Office Environments", *Environmental Health Perspectives* 214.

⁷⁵ Futura Sciences (2021), « Isolation phonique et isolation thermique : quelle différence ? », avec l'aide de l'ouvrage L'isolation phonique écologique, écrit par l'ingénieur du son Jean-Louis Beaumier.

⁷⁶ Ezratty V., Ormandy D., Laurent M. H., Boutière F., Duburcq A., Courouve L. et Cabanes P. A. (2018), « Évaluation des coûts et des bénéfices pour la santé de la rénovation énergétique en France », Environnement, Risques et Santé.

⁷⁷ I4CE (2022), « Se donner les moyens de s'adapter aux conséquences du changement climatique en France : de combien parle-t-on ? ».

l'augmentation de la sinistralité⁷⁸ moyenne due au climat à horizon 2050 en France, qui pourrait augmenter entre 27 % et 62 % du simple fait du changement climatique, voire entre 47 % et 85 % en tenant compte de l'évolution de la population et du nombre d'entreprises, par rapport à la situation actuelle⁷⁹. Les inondations sont les principales responsables de ces dommages, et les zones inondables vont s'étendre sous l'effet du changement climatique par remontée des nappes phréatiques, débordement des cours d'eau et retrait du trait de côte. Géographiquement, les centres urbains déjà sujets à des risques plus importants d'îlots de chaleur, multiplient, par la densité de leurs systèmes productifs, les conséquences économiques d'un aléa climatique. Les territoires ultramarins demeurent fortement exposés aux cyclones, dont l'effet causal sur l'activité 20 ans après leur passage est estimé à -0,4 pt de PIB⁸⁰. Enfin, 55 % du territoire français hexagonal est désormais sujet au développement de feux de forêt (en moyenne sur 2016-2025), contre 21 % sur la période 1961-1990⁸¹.

Des infrastructures existantes dans des secteurs spécifiques pourraient être dépréciées prématurément. Le retrait-gonflement des argiles, notamment dans le Sud-Ouest de la France⁸², et la fragilisation des sols de manière plus générale, menacent directement la stabilité et la qualité du parc industriel et immobilier, en dégradant les structures des constructions à fondations superficielles et les réseaux enterrés, e.g. les réseaux de distribution d'eau et d'énergie. Le réchauffement climatique pèse également sur l'efficacité de certains processus productifs, certaines infrastructures étant inadaptées à un fonctionnement dans un monde plus chaud (arrêt des centrales thermoélectriques et nucléaires en été en cas de réchauffement des cours d'eau – l'Ademe⁸³ estime une baisse possible de 20 % de la production hydroélectrique et thermique à parc constant dans un monde à +4°C –, dégradation des réseaux ferroviaires⁸⁴ et routiers, impossibilité pour certains avions de décoller du fait d'une vague de chaleur⁸⁵). Enfin, la raréfaction de l'enneigement menace la pérennité de l'économie en montagne, alors que l'intensification des vagues de chaleur et la raréfaction de l'eau mettent en danger la soutenabilité du tourisme estival sur le pourtour méditerranéen⁸⁶. Les conséquences économiques des catastrophes naturelles pouvant se propager le long des chaînes logistiques (immobilisant transports, fournisseurs et usines, goulets d'étranglement), elles peuvent dès lors entraîner une sous-utilisation du capital productif. Selon l'Ademe⁸⁷, sur la base de fonctions de dommage sectorielles et du modèle ThreeME, le coût économique des dommages climatiques liés aux risques aigus (augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements climatiques extrêmes) pour la France dans un scénario d'inaction serait autour de 4,5 pts de PIB en 2050. Ces dommages seraient restreints à 3 pts en 2050 en cas de transition ordonnée. Le NGFS⁸⁸ évalue ces dommages à 11 pts du PIB en 2050 en cas d'inaction contre 5 pts dans un scénario de transition ordonnée.

Les destructions touchent directement le stock de capital productif, mais la matérialisation des risques pèse sur l'accumulation du capital, et par conséquent, sur la croissance potentielle. En théorie, à taux d'intérêt inchangé, une hausse du taux de dépréciation augmente mécaniquement le coût

⁷⁸ La sinistralité, terme assurantiel, est la valeur monétaire des dommages assurés.

⁷⁹ Caisse Centrale de Réassurance (2023), « Étude sur les conséquences du changement climatique sur le coût des catastrophes naturelles en France à horizon 2050 », L'Essentiel by CCR. La première estimation « simple fait du changement climatique » est établie à structures économiques inchangées alors que la seconde « considérant la vulnérabilité économique » tient compte de l'extension possible des activités humaines dans les zones à risque.

⁸⁰ Hsiang S. M. et Jina. A. S. (2014), "The causal effect of environmental catastrophe on long-run economic growth: evidence from 6,700 cyclones", WP 20352, NBER.

⁸¹ Rapport annuel du Haut conseil pour le climat, juillet 2026.

⁸² Rapport Ledoux, ordonnance n° 2023-78 du 8 février 2023.

⁸³ Jacquetin F., Callonnec G., Gouédard H. et Devillers A. (2023), « Les risques climatiques et leurs coûts pour la France. Une évaluation macroéconomique », Ademe, 56 pages.

⁸⁴ Dépoues V. (2017), "Organisation uptake of scientific information about climate change by infrastructure managers: the case of adaptation of the French Railway company", Climatic Change.

⁸⁵ Carbone 4 (2021), « Le rôle des infrastructures dans la transition bas-carbone et l'adaptation au changement climatique de la France », rapport complet.

⁸⁶ Amelung B. et Moreno A. (2009), "Impacts of climate change in tourism in Europe. PESETA-Tourism study", JRC Scientific and Technical Reports, EUR 24114 EN, Luxembourg.

⁸⁷ ADEME (2023), *op. cit.*

⁸⁸ NGFS (2025), "NGFS Climate Scenarios for Central Banks and supervisors – Phase V.".

du capital associé. Un coût du capital plus important rehausse le seuil minimum de rentabilité attendue des projets d'investissement, de sorte que l'investissement agrégé diminue, et partant l'activité. Cet effet négatif sera néanmoins plus ou moins significatif au niveau macroéconomique, selon le degré d'exposition des entreprises et des secteurs aux aléas naturels. Par ailleurs, la perte de valeur des actifs sous-jacents au capital déprécié détenus par les agents pourrait contraindre les institutions financières à accroître leurs provisions et à diminuer leur capacité à octroyer des crédits. Ainsi, à niveau d'investissement donné, des effets d'éviction pourraient avoir lieu face à l'importance des besoins de reconstruction et de remplacement du capital obsolète par du capital plus durable, conduisant à des reports d'autres investissements productifs. Ces effets d'éviction ne sont significatifs au niveau macroéconomique que s'ils concernent le capital productif : les investissements de reconstruction et d'adaptation entrepris par les ménages (notamment dans le parc immobilier) n'influencent en effet pas directement la croissance potentielle.

L'augmentation de l'incertitude environnementale – le changement climatique entraînant une augmentation de la fréquence et de l'intensité des aléas climatiques – modifie le comportement des investisseurs et renforce l'aversion au risque agrégée, ce qui risque également d'obérer l'investissement. Les ménages comme les entreprises internalisent la possibilité de catastrophes plus fréquentes, deviennent plus prudents et réduisent leurs investissements. Le risque de catastrophe génère une incertitude sur la productivité et la dépréciation du capital, de sorte que les agents qui ont une aversion pour le risque augmentent leur épargne et diminuent leurs investissements dans le capital à risque. Si l'aversion au risque des agents est plus forte, les désastres peuvent générer des effets de demande négatifs plus importants et conduire à un niveau plus bas du taux d'intérêt naturel⁸⁹. La dépréciation accélérée du stock de capital et la réalisation aléatoire des chocs climatiques augmente les risques financiers, en rehaussant le risque de défaut et le coût du capital. Cela a pour conséquence i) d'augmenter les primes assurantielles, avec un risque d'accroissement du nombre d'entreprises non couvertes pour le risque climatique, qui accroît l'imperfection des systèmes financiers, bloque la réallocation des facteurs⁹⁰ et défavorise relativement les petites entreprises, et ii) de renchérir le coût du crédit, réduisant la capacité à investir, à innover et à générer de nouveaux gains de productivité. Au niveau agrégé, les contraintes financières des entreprises se resserreraient (aggravées par un resserrement monétaire marginal lié à l'inflation climatique⁹¹) et l'investissement productif diminuerait, alors même que les besoins d'investissement pour l'adaptation et la résilience face au changement climatique augmenteraient. De manière générale, l'incertitude concernant les températures⁹² peut augmenter les risques de pannes de courant⁹³, réduire directement la productivité du travail, augmenter l'exposition des entreprises aux risques environnementaux et économiques, et réduire leurs investissements et la consommation des ménages⁹⁴.

Un rehaussement du taux de dépréciation ou une baisse du taux d'utilisation des capacités de production, induit par le changement climatique, impliquerait actuellement une faible baisse de l'activité pour les économies développées ; mais l'effet est potentiellement sous-estimé. Une

⁸⁹ Cantelmo A. (2022), "Rare Disasters, the Natural Interest Rate and Monetary Policy", *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, Vol. 84, Issue 3, pp. 473-496.

⁹⁰ Basker E. et Miranda J. (2018), "Taken by storm: business financing and survival in the aftermath of Hurricane Katrina", *Journal of Economic Geography*, Vol. 18, Issue 6, pp. 1285-1313. La hausse du risque climatique engendre une baisse du taux de couverture assurantielle des entreprises (en premier lieu les plus petites, indépendamment de leur productivité). L'accroissement des frictions sur les marchés financiers assurantiels réduit théoriquement leur capacité à allouer optimalement les ressources et les facteurs de production aux entreprises, ce qui diminue la croissance potentielle à long terme.

⁹¹ La baisse du taux d'intérêt naturel et la hausse de l'aversion au risque impliquent une baisse de l'inflation *ex-ante*. Cependant, *ex-post*, ils sont majorés par la réalisation des chocs climatiques en raison de la destruction du capital physique et d'une perte temporaire de productivité, effet qui dominerait. Voir Cantelmo (2022), *op. cit.* et Sahuc J.-G., Smets F. et Vermandel G. (2025), "The new Keynesian Climate model", *EconomiX Working Papers*.

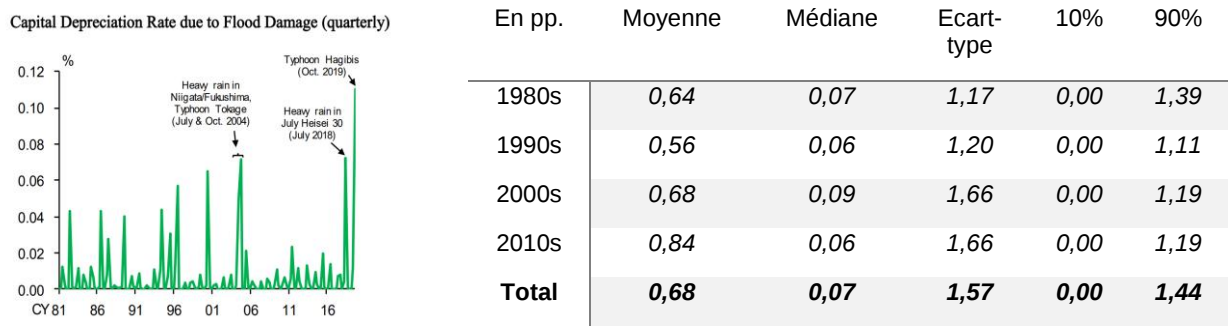
⁹² Bettarelli L., Furceri D., Ganslmeier M. et Schiffbauer M. (2025), "The economic costs of Temperature uncertainty", FMI, *Working Paper*, n° 2025026.

⁹³ Alfaro I., Bloom N. et Lin X. (2022), "The Finance Uncertainty Multiplier", NBER, *Working Papers*, n° 24571. Cet article montre notamment que l'incertitude sur les prix de l'énergie aux États-Unis réduit l'investissement des entreprises dans le développement et l'entretien des infrastructures énergétiques.

⁹⁴ Bloom N. (2009), "The Impact of Uncertainty Shocks", *Econometrica*, 77.

évaluation de la Banque du Japon⁹⁵ montre une variation significative du taux de dépréciation du capital consécutive à des inondations de grande échelle, avec une nette augmentation de sa moyenne et de son écart-type depuis 1980⁹⁶ (cf. Graphique 1), ce qui suggère que la hausse récente de la fréquence des fortes précipitations se traduit par une augmentation des dommages causés par les inondations. À l'aide d'un modèle d'équilibre général dynamique et stochastique néo-keynésien avec des frictions financières, l'étude montre que ces chocs climatiques auraient impliqué une contraction temporaire de l'activité d'environ 0,1 pt de PIB, qui se seraient résorbés en quelques années. La prise en compte d'un système assurantiel rendrait cet impact non-significatif. L'augmentation des inondations et de leur intensité pourrait rehausser cet impact à -0,4 pt de PIB. Une autre étude, réalisée sur la base d'un modèle d'équilibre général dynamique et stochastique calibré sur les pays de l'OCDE, conclut que le niveau de la productivité globale des facteurs pourrait diminuer de 0,2 point de manière permanente⁹⁷. Toutefois, la non-prise en compte des externalités sectorielles et géographiques des destructions des infrastructures dans les évaluations de l'impact macroéconomique des catastrophes naturelles conduisent probablement à sous-estimer les pertes d'activité. Dès lors, l'intensification et la répétition des aléas climatiques liées au changement climatique, pourraient obérer la croissance potentielle par ce canal.

**Graphique 1 : Taux de dépréciation du capital lié aux inondations au Japon ;
Statistiques descriptives**



Source : Sudo et al. (2022) ; Fréquence Trimestrielle.

Note de lecture : En moyenne, le taux de dépréciation du capital a augmenté de 0,84 point de pourcentage par les inondations dans la décennie 2010. La hausse de cette moyenne est associée à une 'augmentation de son écart-type, alors que la médiane reste basse et stable. La calibration du taux de dépréciation du capital est ex-ante de 2,8 p.p.

L'approche par le capital naturel permet d'appréhender l'échelle de l'érosion du capital liée au changement climatique. Les travaux économiques ne mentionnent d'ordinaire pas le capital naturel (incluant l'eau, la terre - dont les minéraux et ressources -, l'air et les écosystèmes) dans la fonction de production, car il est très dur de le modéliser et d'isoler son effet (e.g. la pluie), mais son rôle dans les processus productifs est significatif. Une fonction de production réaliste devrait l'inclure⁹⁸ (avec une faible substituabilité vis-à-vis des autres facteurs), alors que le changement climatique détruit son stock, sa disponibilité et sa productivité. La valeur économique de 17 services écosystémiques^{99,100} pour l'ensemble

⁹⁵ Sudo N. et Hashimoto R. (2022), "Transmission of Flood Damage to the Real Economy and Financial Intermediation: Simulation Analysis using a DSGE mode", Bank of Japan, *Working Papers*, n° 22-3-5.

⁹⁶ La diminution des années 1990 traduisant l'accumulation rapide de capital pendant la bulle spéculative japonaise.

⁹⁷ Cantelmo (2022), *op cit*.

⁹⁸ Barbier E. B. (2014), "Natural Capital", in Dieter Helm, and Cameron Hepburn (eds), *Nature in the Balance: The Economics of Biodiversity*.

⁹⁹ Les services écosystémiques se classent d'après la CICES (Common International Classification of Ecosystem Services, gérée par l'Agence Européenne de l'Environnement) selon quatre catégories : les services de régulation (purification de l'air, séquestration du carbone, pollinisation...), les services d'approvisionnement (matières premières, ressources médicinales, nourriture, énergie), les services culturels (notamment le tourisme) et les services d'appui, qui permettent aux autres écosystèmes de se développer (chaîne alimentaire, production de matière organique).

¹⁰⁰ Voir également Bouchet V., Bourcet C., Cécillon E. et Lavaud S. (2021), « [Évaluations économiques des services rendus par la biodiversité](#) », Direction générale du Trésor, *Trésor-Éco*, n° 294.

de la biosphère (calculée en 2014) a été estimée en moyenne à plus de deux fois le PIB mondial, et avec une perte annuelle de plus de 3 500 Md€ pour les services naturels et plus de 5 500 Md€ liées à la dégradation des terres¹⁰¹. La destruction du capital naturel par le changement climatique a un impact conséquent sur la croissance potentielle, par la disparition des services rendus par la biodiversité et les coûts d'ajustement nécessaires à la mise en place de substitutions pour trouver des modèles alternatifs. La crise climatique et la crise de la biodiversité sont interconnectées, et les dommages économiques qu'elles provoquent se renforcent mutuellement en raison des co-bénéfices perdus sur l'atténuation des solutions naturelles d'adaptation et des destructions écosystémiques¹⁰². Certains modèles économiques pourraient disparaître, tandis que d'autres pourraient devenir trop coûteux et perdre des parts de marché. Par exemple, la disparition des zones humides accroît la vulnérabilité aux tempêtes conduisant à des destructions d'infrastructures (productives) humaines¹⁰³ et la diminution du nombre de pollinisateurs réduit la productivité agricole. Toutefois, l'impact causal du changement climatique sur les rendements agricoles en France demeure incertain : le projet Climator¹⁰⁴ paru en 2012, relevait des possibilités d'adaptation assez larges, avec par exemple un décalage des cultures, pour aboutir à des opportunités dans de nombreux cas (blé, colza) malgré de grandes hétérogénéités géographiques.

1.2.2. La transition bas-carbone pourrait peser sur l'accumulation de capital du fait de l'échouage d'une partie du stock de capital, et par conséquent sur le niveau de PIB potentiel, mais ce risque peut être atténué en définissant une vision stratégique partagée de la décarbonation pour guider les anticipations

La transition bas-carbone peut générer un déclassement prématuré et potentiellement irréversible d'une partie du stock de capital. En substituant des technologies faiblement intensives en carbone à des technologies à fortes émissions, les politiques de décarbonation peuvent conduire à une perte de valeur économique prématurée de certains actifs, plus rapide que leur dépréciation comptable théorique. Dès lors que l'actif ne peut être converti pour un autre usage, il risque d'être considéré comme un actif échoué. Le risque d'échouage concerne l'ensemble des agents institutionnels (ménages, entreprises, institutions financières, administrations publiques) aussi bien sur leurs actifs productifs que non productifs : immobilisations financières (actions, obligations...), corporelles (bâtiments, machines...), incorporelles (brevets...) et également le capital humain (abordé dans la section précédente).

En cas de matérialisation du risque d'échouage de capital, par exemple du fait d'anticipations erronées, ses impacts macroéconomiques pourraient peser sur l'accumulation du capital, et par conséquent, sur le niveau de PIB potentiel. Comme vu précédemment pour l'impact du changement climatique sur l'accumulation de capital, la hausse du taux de dépréciation engendrée par l'échouage de capital augmenterait mécaniquement son coût, conduisant à une baisse de l'investissement agrégé avec un effet plus ou moins significatif au niveau macroéconomique selon le degré d'exposition des entreprises et des secteurs au risque d'actifs échoués. Le choc de capital échoué peut également se traduire par une baisse du taux d'utilisation du capital et donc des capacités productives. Par ailleurs, de la même manière qu'en cas de destruction d'actifs, du fait d'aléas climatiques, la perte de valeur des actifs sous-jacents au capital échoué (titres financiers liés aux secteurs carbonés) détenus par les agents dans le cadre de la transition bas-carbone, pourrait conduire à une restriction du crédit et à des effets d'éviction sur d'autres

¹⁰¹ Costanza R., de Groot, R., Sutton P., van der Ploeg S., Anderson S., Kubiszewski I., Farber S. et Turner R. K. (2014), "Changes in the global value of ecosystem services", *Global Environmental Change*, Vol 26. P 152-158. Ces estimations sont, selon les auteurs, utiles pour se rendre compte de la magnitude des services rendus par la nature majoritairement situés hors de tout marché.

¹⁰² Giglio S., Kuchler T., Stroebe J. et Wang O. (2025), "Nature loss and climate change: the twin crisis multiplier", NBER, *Working Papers*, n°33361.

¹⁰³ Narayan S., Beck M. W., Wilson P., Thomas C. J., Guerrero A., Shepard C. C., Reguero B. G., Franco G., Ingram J. C. et Trespalacios D. (2017), "The Value of Coastal Wetlands for Flood Damage Reduction in the Northeastern USA", *Nature, Scientific Reports*, Vol. 7, No 9463.

¹⁰⁴ Ademe (2012), « Livre vert du projet Climator (2007-2010). Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces ». Ses résultats sont cependant sujets à caution, car ils supposent un déficit hydrique compensé, admettent une plus grande volatilité temporelle et géographique des rendements en ne prennent pas en compte les risques que font peser les nouvelles maladies des plantes.

investissements productifs. Il existe également un risque de propagation du choc de capitaux échoués dans la chaîne de valeur par le biais des interconnexions économiques et financières entre secteurs. Par exemple, les secteurs économiques utilisant des produits des industries extractives comme intrants risquent d'être négativement touchés par l'échouage d'actifs dans ces industries.

De plus, substituer du capital vert au capital brun, qui bénéficie d'un plus long historique de recherche et développement, pourrait en moyenne diminuer la productivité du capital à court terme.

En effet, ces deux derniers siècles ont été marqués par des investissements dans le brun, tandis que ceux dans le vert n'ont émergé que récemment. Le passage d'une technologie brune à une technologie verte pourrait impliquer des coûts d'installation qui donneraient à la première un avantage de productivité face à la seconde¹⁰⁵. Une baisse de la productivité moyenne du capital augmenterait mécaniquement son coût avec un impact négatif sur l'investissement et, consécutivement, sur la croissance potentielle. La rapidité du retour à la productivité antérieure, voire son dépassement, dépendra de la vitesse des gains de productivité dans le secteur vert et du progrès technologique.

Le montant de capital échoué reste difficilement appréciable, du fait de l'absence de consensus sur la méthode d'estimation et des périmètres sectoriels restreints des études existantes.

Trois méthodes principales peuvent être mobilisées pour estimer le montant total de capitaux échoués induits par la transition bas-carbone¹⁰⁶ : la méthode de l'inventaire permanent, la méthode des flux de trésorerie actualisés et la méthode des tableaux d'entrées-sorties. La majorité des estimations existantes portent sur le secteur de l'extraction des énergies fossiles uniquement, ce dernier étant plus directement exposé au risque d'échouage d'actifs mais le risque reste limité en France au regard de sa spécialisation sectorielle. Au-delà des activités d'extraction d'énergies fossiles, l'échouage de capital pourrait toucher d'autres secteurs exposés comme l'agriculture, les industries manufacturières, la production d'électricité à partir d'énergies fossiles, la construction, le secteur immobilier, les transports et dans le cas plus spécifique de la France, le tourisme¹⁰⁷.

Les estimations de l'impact macroéconomique de l'échouage d'une partie du stock de capital sont rares.

L'apparition de capital échoué peut être modélisée par une augmentation de la dépréciation du capital, liée à l'internalisation de contraintes environnementales par les agents économiques. Une étude de l'Ademe (2023)¹⁰⁸, fondée sur l'utilisation du modèle ThreeME, propose ainsi d'introduire une chronique de capitaux échoués pour l'immobilier résidentiel et tertiaire, calibrée à partir des estimations de l'Irena (2017)¹⁰⁹ pour la France, dans un scénario de transition retardée. En 2030, l'activité serait diminuée de 0,5 point de PIB par rapport à un scénario sans choc et de 2 points à l'horizon 2050. Les modèles à croissance endogène peuvent également se révéler pertinents pour modéliser l'échouage de capitaux bruns en tenant compte de la propagation entre entreprises d'éventuels effets d'apprentissage générés par l'innovation et susceptibles de générer des externalités positives (hausse de la productivité, baisse des coûts). Baldwin *et al.* (2020)¹¹⁰ construisent ainsi un modèle théorique à croissance endogène pour observer l'impact de politiques de décarbonation en présence d'effets d'apprentissage : leurs résultats suggèrent que les effets d'apprentissage dans les secteurs verts accélèrent la transition en faisant émerger plus tôt un substitut compétitif aux énergies carbonées, permettant de limiter la quantité de capitaux échoués. Campiglio *et al.* (2022)¹¹¹ estiment, à l'aide d'un modèle DSGE, que ce risque et les frictions dans la réallocation du capital pourraient augmenter le coût social du carbone nécessaire à l'accomplissement de la transition, mais que le coût économique associé reste inférieur à celui du rehaussement des

¹⁰⁵ Ferrari M. et Pagliari M. S. (2021), "No country is an island. International cooperation and climate change", Banque de France, *Working Papers*, n°815.

¹⁰⁶ Girard P.-L., Abbas R., Schweizer R. et Trinh J. (2023), « Les incidences économiques de l'action pour le climat : rapport thématique sur le marché du capital ».

¹⁰⁷ Girard *et al.* (2023), *op. cit.*

¹⁰⁸ Ademe, Seureco, Banque de France et Cired (2023), *op. cit.*

¹⁰⁹ Irena (2017), "Stranded assets and renewables: how the energy transition affects the value of energy reserves, buildings and capital stock", Agence internationale pour les énergies renouvelables, *Working Papers*.

¹¹⁰ Baldwin E., Cai Y. et Kuralbayeva K. (2022), "To build or not to build? Capital stocks and climate policy", *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 100.

¹¹¹ Campiglio E., Dietz S. et Venmans F. (2022), "Optimal climate policy as if the transition matters", CESifo WP.

dommages climatiques en cas de transition retardée. Une étude de l'Insee¹¹² estime à partir d'un modèle stylisé calibré pour la France que le risque d'échouage peut être minimisé si la décarbonation de l'économie s'appuie sur une approche en budget carbone, les acteurs économiques pouvant ainsi anticiper les mesures et adapter leur comportement en conséquence.

In fine, la matérialisation du risque d'actifs échoués dépendra de la mise en œuvre de la transition bas-carbone, des élasticités de substitution entre les facteurs de production et de la capacité à définir collectivement des orientations capables de guider au mieux les anticipations des acteurs.

Si la transition est ordonnée, accompagnée de progrès technique et prédictible afin que les agents économiques puissent adapter leur comportement, le capital intensif en carbone pourrait être graduellement remplacé une fois déprécié par du capital vert à coût relativement limité. Si la transition est abrupte, peu prévisible ou si elle survient avant que des technologies vertes ne soient suffisamment développées, le capital intensif en carbone deviendrait obsolète avant sa dépréciation effective, conduisant à une baisse du stock de capital¹¹³ et des pertes pour les entreprises. Dans tous les cas, un prix du carbone (au moins implicite) significativement élevé à court terme est nécessaire pour éviter le maintien d'investissements bruns et de futurs actifs échoués¹¹⁴. Par ailleurs, l'ampleur de l'échouage de capitaux dépendra de la substituabilité des facteurs de production. Dans le cas où le capital et les énergies fossiles seraient complémentaires, toute mesure de décarbonation contraignant l'utilisation des énergies fossiles pourrait s'accompagner d'une baisse du stock de capital mobilisé dans la production et donc à une baisse de la production, *modulo* l'ajustement du facteur travail et du progrès technique. Cette situation impliquerait l'échouage de la partie du stock de capital délaissée en l'absence de reconversion à d'autres usages. Au contraire, en cas de substituabilité des énergies fossiles et du facteur capital, les risques d'échouage et leur impact négatif sur la croissance potentielle seraient limités. Les travaux empiriques visant à estimer les élasticités de substitution entre facteurs de production pour la France obtiennent des résultats très hétérogènes, mais avec une majorité des études concluant à une substituabilité faible (élasticité comprise entre 0 et 1)¹¹⁵ : l'élasticité de substitution estimée entre le capital et l'énergie (tous types d'énergies confondus) serait comprise entre -0,043 (complémentarité) et 1 (fonction de Cobb-Douglas). Ces études diffèrent en plusieurs points : dans les hypothèses de forme fonctionnelle préalables aux estimations économétriques, les données (données d'entreprises ou de comptabilité nationale), les méthodes d'estimation, les périodes d'estimation et les secteurs couverts. Un autre facteur important sera la substituabilité entre énergies fossiles et renouvelables. Cette élasticité, plus élevée que celle entre capital et énergie, a été estimée sur données françaises autour de 2,9¹¹⁶.

1.3. Canal de la productivité globale des facteurs (PGF)

1.3.1. L'impact du changement climatique sur la PGF sera négatif, mais son ampleur reste incertaine

Le changement climatique diminue la capacité de l'économie à allouer les facteurs de production vers les entreprises et les secteurs les plus productifs. La croissance potentielle et la productivité de l'économie dépendent non seulement de gains de productivité intra-entreprises, mais aussi de l'allocation optimale des facteurs de production en fonction des chocs économiques. Le changement climatique détourne une partie des ressources vers l'adaptation, la prévention et la reconstruction des dommages climatiques. Cela crée, malgré la nécessité de ces investissements, un effet d'éviction qui détourne une partie des facteurs de production d'un équilibre sans changement climatique maximisant la croissance

¹¹² Abbas R., Carnot N., Lequien M., Quartier-La-Tente A. et Roux S. (2024), « [En chemin vers la neutralité carbone. Mais quel chemin ?](#) », Insee, *Documents de travail*, 2024-11.

¹¹³ Parker M. (2023), "How climate change affects potential output", BCE, *Economic Bulletin*, Issue 6/2023.

¹¹⁴ Hambel C. et Van der Ploeg F. (2025), "Pricing in Transition and Physical Risks – Carbon premiums and Stranded Assets", *Journal of Monetary Economics*, Vol 152- 103780. Selon cette étude utilisant un DSGE avec deux secteurs, des anticipations rationnelles et une modélisation du risque climatique, la prise en compte du risque d'actifs échoués pourrait rehausser le prix du carbone (mesurant l'intensité de l'action climatique) d'environ 1 p.p/an.

¹¹⁵ Girard et al. (2023), *op. cit.*

¹¹⁶ Jo A. et Karydas C. (2023), "Firm heterogeneity, Industry Dynamics and Climate Policy", *Bath Economics Research Papers* No. 94/22.

potentielle. Une estimation par doubles différences en Europe de 2009¹¹⁷ montre que dans les zones touchées par des inondations, même les entreprises qui maintiennent un niveau d'investissement et d'emploi constant font face à une diminution de la productivité globale des facteurs à long terme, suggérant que les efforts de reconstruction et de résilience détournent une partie des efforts d'investissement.

L'hypothèse de la destruction créatrice dans les zones sinistrées, selon laquelle les catastrophes naturelles ayant vocation à devenir plus fréquentes et plus intenses, représentent des opportunités pour accélérer la destruction créatrice et les gains de productivité, reste controversée. En détruisant le stock de capital, les aléas permettent en théorie un renouvellement des infrastructures et des systèmes de production. La reconstruction se déroulerait plus proche des normes et de la frontière technologique actuelles et les aléas climatiques permettraient une *actualisation* du stock de capital. Par exemple, les agriculteurs sujets à des sécheresses sont plus susceptibles d'investir dans des variétés plus résistantes les années suivantes¹¹⁸, et les feux de forêt poussent à la modernisation des réseaux de distribution électriques. Cependant, l'argument peut être établi qu'à l'inverse, au regard des coûts économiques du changement climatique et en présence de contraintes de financement, la reconstruction s'opère selon les solutions les moins coûteuses et potentiellement plus loin de la frontière technologique¹¹⁹. Ainsi, avec des contraintes de financement, et un risque connexe d'effet d'éviction des investissements de reconstruction des équipements non productifs sur les autres formes d'investissements, rien ne garantit une reconstruction plus productive après les désastres. Une première étude sur données en coupe par désastres naturels réalisée en 2002¹²⁰, conclut que les désastres se traduiraient par une croissance du PIB et de la productivité totale des facteurs, due à l'adoption de nouvelles technologies. La régression, en contrôlant notamment par les zones géographiques, indique qu'une augmentation d'un écart-type de la fréquence des désastres naturels augmenterait la croissance économique annuelle moyenne de 22,4 %. Les auteurs mettent en avant deux hypothèses pour expliquer ce résultat :

- La productivité des entreprises survivantes devrait augmenter, du fait de la résilience acquise pendant la crise, de l'actualisation du stock de capital et de l'adoption de nouvelles technologies. Toutefois, cette hypothèse n'a pas été vérifiée empiriquement. Si les entreprises survivantes du tremblement de terre de Kobe de 1995 ont eu un niveau d'investissement supérieur aux entreprises non-touchées¹²¹, la hausse de l'emploi et de la valeur ajoutée a été inférieure¹²². En Europe, Leiter *et al.* (2009)¹²³ constatent que les entreprises situées dans les régions touchées par une inondation majeure en 2000 ont connu une croissance des actifs et de l'emploi plus élevée, mais une valeur ajoutée relativement plus faible, ce qui suggère une baisse de la productivité.
- Les entreprises les moins productives devraient sortir du marché, augmentant la productivité moyenne en réponse. Au Japon, Uchida *et al.* (2014)¹²⁴ suggèrent que le processus de destruction créatrice intervient tant à l'intérieur qu'à l'extérieur des zones touchées, sans différence quantitative entre les espaces. Cependant, la probabilité de faillite est plus faible dans la zone touchée : les entreprises qui sortent du marché réalisent des sorties « volontaires » et non forcées. Cela suggère

¹¹⁷ Leiter A., Oberhofer H. et Raschky P. (2009), "Creative Disasters? Flooding Effects on Capital, Labour and Productivity Within European Firms", *Environmental & Resource Economics*, Vol. 43, No 3, pp. 333-350.

¹¹⁸ McSweeney K. et Coomes O. (2011), "Climate-related disaster opens a window of opportunity for rural poor in Northeastern Honduras", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(13), 5203-5208.

¹¹⁹ En outre, l'adoption de l'innovation apparaît procyclique et est fortement corrélée à l'évolution de l'activité, dont le changement climatique risque d'obérer la croissance. Voir par exemple, Elfsbacka Schmöller M. et Spitzer M. (2021), "Deep recession slowing productivity and missing disinflation in the Euro Area", *European Economic Review*.

¹²⁰ Skidmore M. et Toya. H. (2002), "Do natural disasters promote long-run growth?", *Economic Inquiry* 40:664-87.

¹²¹ Hosono K., Miyakawa D., Uchino T., Hazama M., Ono A., Uchida H. et Uesugi I. (2012), "Natural Disasters, Damage to Banks, and Firm Investment", *RIETI Discussion Paper* 12-E-062.

¹²² Tanaka A. (2013), "The impacts of natural disasters on plants' growth: Evidence from the Great Hanshin-Awaji (Kobe) earthquake", *Regional Science and Urban Economics* 50, 31-41.; Cole M A., Elliott R., Okubo T. et Strobl E. (2015), "Natural Disasters and Plant Survival: The impact of the Kobe earthquake", *RIETI Discussion Paper Series* 13-E-063.

¹²³ *Op. cit.*

¹²⁴ Uchida H. (2014), "Tohoku Earthquake and firm exit: Analysis using a corporate database", *Business Research* (Graduate School of Business Administration, Kobe University), No. 60.

que même si l'intervention politique a réduit les défauts de paiement des entreprises et donc les faillites, de nombreuses entreprises peuvent encore avoir eu des difficultés à rester en activité dans l'environnement post-tremblement de terre. Il n'y a donc pas de preuves directes de cette hypothèse. Un possible effet positif sur la productivité ne parvient pas forcément à dépasser le choc négatif initial en niveau.

Ces résultats demeurent empiriques et microéconomiques, et la question de leur extension en cas de catastrophes répétées et non exceptionnelles se pose. En Europe, sur la période 2007-2018, les inondations ont détérioré de manière significative et persistante les performances des entreprises touchées, et peuvent mettre en péril leur survie. Une inondation moyenne détériore les actifs d'environ 2 % dans l'année qui suit (vs l'année précédente), sans redressement significatif dans les 7 années qui suivent¹²⁵. Toutefois, si au niveau agrégé la productivité peut remonter, cela est dû à une forte hétérogénéité entre entreprises : ce sont celles qui ne sont pas directement touchées par les dégâts des eaux qui sont *créatrices*, alors que celles directement touchées font face à la destruction. Au niveau mondial – et donc principalement pour les pays en développement, plus touchés –, les pertes économiques immédiates d'une catastrophe naturelle ne sont pas compensées par une croissance supérieure¹²⁶.

Les conséquences économiques des catastrophes naturelles peuvent se propager le long des chaînes logistiques en immobilisant transports, fournisseurs et unités de production, et en multipliant les goulets d'étranglement. Au niveau macroéconomique, cela se traduit par une hausse du coût des intrants, et donc une baisse de la productivité (et une hausse de l'inflation). Les catastrophes naturelles en France poussent à se tourner vers des composants étrangers plus chers. Celles à l'étranger agissent également comme des chocs d'offre négatifs en touchant les chaînes de valeur des entreprises françaises. Les pays les plus touchés par l'accumulation des catastrophes naturelles sont ceux dont la production est la plus dépendante des interconnexions mondiales¹²⁷. Comme la France est relativement plus intégrée que d'autres pays comparables dans les chaînes de valeur globales, elle risque une perte de compétitivité de ses entreprises, une baisse de ses exportations, et un PIB plus bas. Une diversification de ses chaînes logistiques constitue toutefois une garantie contre les ruptures d'approvisionnement liées à une catastrophe localisée.

La littérature économétrique souligne que les effets indirects climatiques du changement climatique pèseront significativement sur la croissance potentielle. Les travaux sur les fonctions de dommages¹²⁸, qui visent à analyser *ex-post* l'effet des variations du climat sur la croissance de long terme, puis à les projeter dans des scénarios climatiques, ont récemment souligné une réestimation à la hausse des dommages climatiques encourus par un changement climatique non maîtrisé¹²⁹. Dell *et al.* (2012)¹³⁰ ont pour la première fois mis en évidence des effets en croissance des variations de températures sur la productivité. Bilal et Kanzig (2026)¹³¹ estiment, sur des données historiques en panel, qu'une hausse de la température mondiale de 1°C conduirait, hors modification structurelle des comportements d'adaptation, à une perte d'activité mondiale de 20 pts de PIB à long terme. Le quatrième millésime des scénarios de long-

¹²⁵ Fatica S., Katay G. et Rancan M. (2022), "Floods and firms: vulnerabilities and resilience to natural disaster in Europe", Commission européenne, Joint Research Centre, *Working Papers*, n° 2022-13.

¹²⁶ Voir par exemple Cavallo E., Becerra O. et Acevedo L. (2024), "The Impact of Natural Disasters on Economic Growth", *Inter-American Development Bank-WP-1257*.

¹²⁷ Schleyen J., Dasgupta S., Borsky S., Jury M., Ščasný M. et Bezhanishvili L. (2019), "D2.4 Impacts on Industry, Energy, Services, and Trade", Deliverable of the H2020 COACCH project.

¹²⁸ Largement utilisées pour les modèles d'évaluation impacts, cette branche de la littérature a débuté grâce aux travaux de William Nordhaus, avec son modèle DICE : Nordhaus W. D. (1977), "Economic Growth and Climate: The Case of Carbon Dioxide", *American Economic Review*, 67(1), 341-346. Pour une revue de la littérature sur ces modèles, voir Schubert K. (2019), « William D. Nordhaus : Intégrer le changement climatique dans l'analyse macroéconomique de long terme », *Revue d'économie politique*, 2019/6 Vol 129, 887-908.

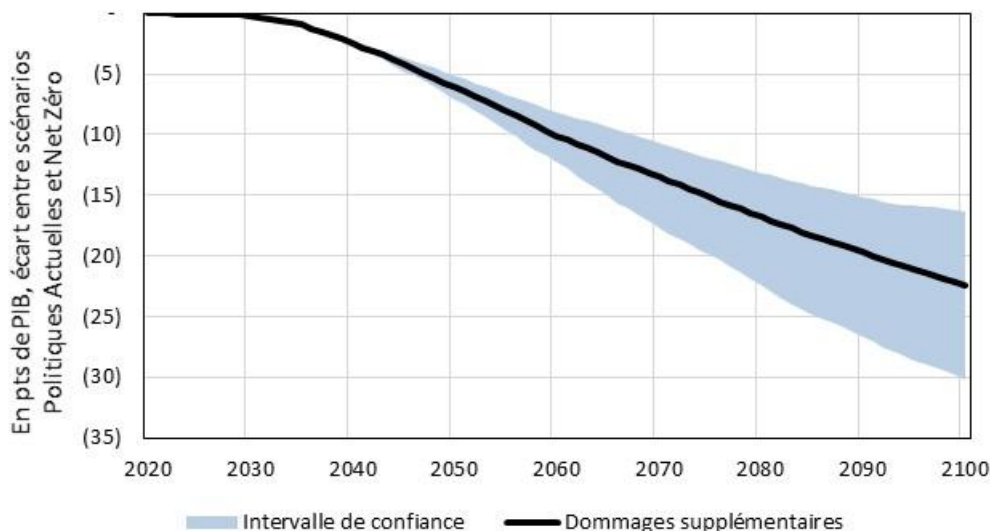
¹²⁹ NGFS (2024), "Damage functions, NGFS scenarios, and the economic commitment of climate change – An exploratory note".

¹³⁰ Dell M., Jones F. B. et Olken B. (2012), "Temperature shocks and economic growth: evidence from the last half century", *American Economic Journal: Macroeconomics* 2012, 4(3): 66-95.

¹³¹ Bilal A. et Kanzig D. (2026), "The Macroeconomic Impact of Climate Change: Global vs. Local Temperature", *The Quarterly Journal of Economics*.

terme du NGFS¹³² estime les dommages aigus et chroniques liés au changement climatique : les pertes d'activité mondiale en 2050 dans un scénario de maintien des politiques actuelles par rapport à un sentier de croissance équilibré ne tenant pas compte des risques physiques et de transition seraient de plus de 7 pts de PIB (estimation médiane) en 2050 (voir Graphique 2). La réconciliation des approches microéconométriques et macroéconomiques suggère que les effets indirects des chocs climatiques sur la productivité sont au moins équivalents aux effets directs sur les entreprises¹³³ : sur données italiennes, dans un scénario à +2°C (respectivement +4°C), la productivité agrégée y diminuerait de 1,7 % (respectivement de 6,8 %), en raison principalement des frictions sur la réallocation des facteurs de production, sans prise en compte toutefois des dynamiques d'entrées-sorties des entreprises.

Graphique 2 : Dommages supplémentaires en France liés à une inaction climatique mondiale



Sources : NGFS (v4), modèles REMIND-MagPIE et NiGEM.

Note de lecture : Cette chronique correspond à l'écart de dommages climatiques entre les simulations – avec dommages climatiques « médians » – des scénarios « Politiques Actuelles » et « Net Zéro 2050 » estimés avec le couplage des modèles REMIND-MagPIE, et NiGEM. Elle ne prend pas en compte de potentiels points de bascule climatiques. Le faible écart à court terme entre les scénarios s'explique par le fait que les dommages climatiques sont liés aux émissions cumulées et non annuelles. Le NGFS prévoit une actualisation de ces chiffres prochainement.

1.3.2. L'impact des politiques de transition bas-carbone sur la productivité totale des facteurs dépendra notamment de la capacité des innovations vertes à générer des gains de productivité intra-entreprise

La hausse des coûts de production et la réorganisation de l'appareil productif liées aux politiques de transition pourraient avoir un effet négatif sur la productivité intra-entreprise à court terme. Les entreprises seraient contraintes d'allouer une partie de leurs facteurs de production à la décarbonation de leur processus productif et à l'efficacité énergétique pour s'aligner sur de nouvelles normes environnementales et limiter l'impact de la hausse du prix du carbone, sans que cela ne leur permette de créer davantage de valeur. Ainsi, à quantité de facteurs de production inchangée, la production des entreprises diminuerait. Cet effet se propagerait des secteurs directement concernés par les politiques environnementales aux secteurs aval par le biais des intrants dont la quantité disponible diminuerait et qui deviendraient plus coûteux. De plus, le risque de friction dans la réallocation intra-sectorielle des facteurs de production pourrait amplifier de manière transitoire l'impact négatif sur l'efficacité allocative.

¹³² Phase IV, utilisant les travaux de Kalkuhl M. et Wenz L. (2020), "The impact of climate conditions on economic production. Evidence from a global panel of regions", *Journal of Environmental Economics and Management* 103.

¹³³ Caggese A., Chiavari A., Singh Goraya S. et Villegas-Sanchez C. (2025), "Climate change, firms, and aggregate productivity", BCE, *Working Paper Series*, n°3084. Dans cette étude, les effets directs recourent la baisse de la productivité et de l'offre du travail, et un moindre taux d'utilisation du capital.

Plusieurs études empiriques observent une baisse de la productivité totale des facteurs des entreprises à court terme après un resserrement de politique environnementale¹³⁴ ou une hausse des prix de l'énergie¹³⁵ qui peut s'expliquer par un ajustement à la baisse de l'utilisation de leurs capacités de production. La Banque Centrale Européenne¹³⁶, à l'aide du modèle E-DSGE multisectoriel EMuSe, trouve une perte de productivité (horaire) du travail, positivement corrélée avec l'intensité des politiques climatiques au niveau européen, à cause de la hausse des coûts de production carbonée. La Banque de France (Henriet *et al.*, 2025¹³⁷) a construit un modèle DSGE, FR-GREEN, capturant les effets de recomposition du stock de capital (vert, fossile ou productif) générés par la transition, qui se traduisent en un ralentissement de la croissance de la productivité globale des facteurs de l'ordre de 0,3 p.p. en moyenne par an, en dehors de toute hausse du progrès technique. Ce choc est ensuite introduit dans leur modèle macroéconométrique FR-BDF pour inférer les effets sur l'économie française. Une étude d'Albrizio *et al.* (2017)¹³⁸ suggère toutefois qu'une hausse de la productivité pourrait être observée au niveau des secteurs industriels à court terme dans les pays les plus proches de la frontière technologique. En effet, des gains d'efficacité allocative pourraient être réalisés au sein des entreprises avec l'ajustement de leur utilisation de l'énergie et du travail dans leur processus de production. En outre, au fur et à mesure que la transition progresse, les coûts des technologies vertes devraient diminuer. C'est notamment le cas dans la génération électrique, où les technologies renouvelables (et notamment solaires) sont désormais moins coûteuses en moyenne que leurs alternatives carbonées¹³⁹.

À court et moyen terme, l'impact de la réallocation sectorielle engendrée par la transition sur la productivité agrégée, et par conséquent la croissance potentielle, dépend de la productivité relative des entreprises et des secteurs concernés. La transition bas-carbone donnera lieu à une réallocation intra et intersectorielle avec des variations de parts de marchés et des entrées et sorties d'entreprises. Si les entreprises croissantes ou entrantes (faiblement émettrices) ont une productivité supérieure aux entreprises décroissantes ou sortantes (fortement émettrices) dans la mesure où elles doivent notamment compenser une productivité des technologies vertes inférieure à celle des technologies brunes¹⁴⁰, la réallocation sectorielle conduira à une hausse de la productivité agrégée sans hausse de la productivité intra-entreprise. La transition pourrait ainsi conduire à la réallocation plus optimale des ressources entre secteurs et entreprises avec l'éviction des entreprises les moins efficaces et l'entrée de nouvelles entreprises plus efficaces disposant de nouvelles technologies. De plus, la réallocation dépendra *in fine* de la capacité des systèmes bancaire et financier à allouer les financements vers les entreprises les plus productives et les plus décarbonées (sans effet d'éviction sur les entreprises productives qui ne sont pas directement concernées par la transition). Toutefois, étant donné le faible nombre de travaux sur la corrélation entre intensité carbone et productivité des entreprises et l'absence de résultats sur données françaises, il est difficile de conclure à un effet positif des réallocations d'activité induites par la transition bas-carbone en France sur la productivité agrégée. La Banque centrale européenne constate dans l'UE une corrélation faiblement positive entre la croissance de la productivité du secteur automobile et le taux

¹³⁴ Voir Benatti N., Groiss M., Kelly P. et Lopez-Garcia P. (2023), "Environmental regulation and productivity growth in the euro area: Testing the Porter Hypothesis", BCE, *Working Papers*, n° 2023/2820 ou Dechezleprêtre A. et Sato M. (2017), "The Impacts of Environmental Regulations on Competitiveness", *Review of Environmental Economics and Policy*, vol. 11 2 183-206.

Lanoie P., Patry M. et Lajeunesse R. (2008), "Environmental regulation and productivity: testing the Porter hypothesis", *Journal of productivity analysis*, 30(2):121-128.

¹³⁵ André C., Costa H., Demmou L. et Franco G. (2023), "Rising energy prices and productivity: short-run pain, long-term gain?", OCDE, Economics Department *Working Paper* N° 1755.

Marin G. et Vona F. (2021), "The impact of energy prices on socioeconomic and environmental performance: evidence from the French manufacturing establishments, 1997-2015", *European Economic Review*.

¹³⁶ Bijmens, G., Anyfantaki S., Colciago A., De Mulder J., Falck E., Labhard V., Lopez-Garcia P., Lourenço N., Meriküll J., Parker M., Röhe O., Schroth J., Schulte P. et Strobel J. (2024), "The impact of climate change and policies on productivity", BCE, *Occasional paper series*, n° 340.

¹³⁷ Henriet F., Kalantzis Y., Lemoine M., Lisack N. et Turunen H. (2025), "Bridging the Gap in Macroeconomic Analysis of the Energy Transition: Combining Medium- and Long-Term Approaches", Banque de France, *Working Papers*, n° 1000.

¹³⁸ Albrizio S., Kozluk T., Zipperer V. (2017), "Environmental policies and productivity growth: Evidence across industries and firms", *Journal of Environmental Economics and Management*.

¹³⁹ IRENA (2022), "Renewable Energy Statistics".

¹⁴⁰ Ferrari M. et Pagliari M. (2021), *op.cit.*

d'électrification¹⁴¹. Une étude de la Banque nationale de Belgique¹⁴² suggère une corrélation négative entre productivité et intensité carbone pour les entreprises industrielles belges à une date donnée mais la corrélation apparaît moins évidente au niveau européen entre rentabilité financière et intensité carbone.

À long terme, la transition bas-carbone devrait générer des innovations vertes mais la capacité de ces dernières à générer des gains de productivité intra-entreprise est incertaine. Selon l'hypothèse faible de Porter¹⁴³, les politiques de transition bas-carbone encouragent l'innovation verte¹⁴⁴. Il existerait également des retombées positives de la recherche sur l'innovation non verte : les brevets de technologies « vertes » génèreraient des retombées de connaissances pour le reste de l'économie plus importantes que les brevets des technologies « brunes » qu'ils remplacent¹⁴⁵. Ainsi, la hausse des brevets des technologies vertes liée à un resserrement des contraintes environnementales ne se fait pas au détriment des brevets dits gris (qui augmentent même légèrement), même si la part des brevets dans les technologies polluantes diminue, signalant l'absence d'effet d'éviction¹⁴⁶. En revanche, l'hypothèse forte de Porter selon laquelle ces innovations donneraient *in fine* lieu à des gains de productivité ne fait pas consensus dans la littérature. Selon Alla (2022)¹⁴⁷, le système européen d'échange de quotas d'émission introduit en 2005 n'a pas nui à la productivité globale des facteurs des entreprises françaises qui aurait même augmenté de 5 % entre 2000 et 2017. Il convient toutefois de préciser que dans cette étude, les entreprises font face à un prix du carbone bien inférieur à celui qui serait nécessaire pour atteindre la neutralité carbone. Benatti et al. (2023)¹⁴⁸ observent, eux, des effets négatifs sur la productivité totale des facteurs d'entreprises de six pays de la zone euro *a minima* à moyen terme¹⁴⁹ malgré des effets positifs sur l'innovation verte sans effet d'éviction sur les autres innovations, en cas de resserrement des politiques environnementales. Les travaux de Dechezleprêtre et Kruse (2022)¹⁵⁰ montrent que les politiques climatiques n'auraient pas d'effet significatif sur la PGF des entreprises, via l'innovation verte, dont les effets pourraient compenser la hausse des coûts de production. La BCE¹⁵¹ indique que, si la croissance de la productivité au niveau des entreprises diminue à court terme à la suite d'un renforcement des politiques environnementales, ce ralentissement pourrait être compensé à long terme, grâce à une augmentation significative du nombre de brevets déposés, à la diffusion de nouvelles technologies au sein de l'appareil productif et au renouvellement du stock de capital productif. Les différentes études disponibles diffèrent toutefois dans la modélisation du choc de transition bas-carbone (simple choc exogène sur les prix de l'énergie, hausse de l'indice de l'OCDE de sévérité de politiques environnementales, mesure historique, etc.) et dans l'estimation de la productivité globale des facteurs des entreprises. Les co-bénéfices associés à la transition bas-carbone, en matière de santé, de qualité de l'air ou d'écosystème, pourraient également soutenir la productivité.

¹⁴¹ Anyfantaki S et al. (2024), *op.cit.*

¹⁴² Bijmens G. et Swartenbroekx C. (2022), "Carbon emissions and the untapped potential of reallocation – Lessons from the EU ETS", *NBB Economic Review*, n° 06.

¹⁴³ Porter M. E. et van der Linde C. (1995), "Towards a new conception of environment-competitiveness relationship", *Journal of Economic Perspectives*, Volume 9 n° 4 p97-118.

¹⁴⁴ Caley R. et Dechezleprêtre A. (2016), "Environmental policy and directed technological change: Evidence from the European carbon market", *Review of Economics and Statistics*, vol. 98, p. 173-191.

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

¹⁴⁵ Dechezleprêtre A., Martin R. et Mohnen M. (2017), "Knowledge spillovers from clean and dirty technologies: A patent citation analysis", Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment, *Working Paper* n° 135.

¹⁴⁶ Benatti N., Groiss M., Kelly P. et Lopez-Garcia P. (2024), "[The impact of environmental regulation on clean innovation: are there crowding out effects?](#)", BCE, *Working Paper Series*, n° 2946. Ce résultat peut s'expliquer par les complémentarités entre technologies vertes et grises.

¹⁴⁷ Alla A. (2022), "[European Union's emissions trading system and productivity: firm-level evidence for France, Italy and Spain](#)", Direction générale du Trésor, *Documents de travail* n° 2022/3.

¹⁴⁸ Benatti N., Groiss M., Kelly P. et Lopez-Garcia P. (2023), "Environmental regulation and productivity growth in the euro area: testing the Porter hypothesis", BCE, *Working Paper Series*, n° 2820.

¹⁴⁹ Les nouvelles innovations nécessitant un certain temps pour être intégrées aux processus de production, les auteurs n'excluent pas qu'un effet positif puisse être observé à plus long terme au-delà de l'horizon de 5 ans qu'ils étudient.

¹⁵⁰ Dechezleprêtre A. et Kruse T. (2022), "The effect of climate policy on innovation and economic performance along the supply chain: a firm and sector-level analysis", OCDE, *Environment Working Papers*, n° 189.

¹⁵¹ Bijmens G. et al. (2024) *op.cit.*

Les différents travaux empiriques soulignent des effets hétérogènes selon les caractéristiques des entreprises et le type de politique mise en œuvre. Les grandes entreprises disposeraient d'un avantage dans la transition bas-carbone au détriment des petites entreprises dont la productivité serait plus négativement touchée. Des caractéristiques propres aux grandes entreprises telles que d'importantes réserves de liquidités, une faible dépendance aux financements externes¹⁵² ou encore l'expérience du brevetage¹⁵³ permettraient de limiter les effets négatifs sur leur productivité. L'impact différencié sur les entreprises selon leur taille permettrait aux grandes entreprises d'étendre leur pouvoir de marché. Une concentration accrue du marché serait alors susceptible d'engendrer une perte de productivité du fait d'une baisse de dynamisme économique. En outre, une hausse de la rigueur des politiques environnementales ne bénéficierait qu'aux entreprises les plus productives¹⁵⁴. Les régulations environnementales apparaissent, pour la stimulation de l'innovation verte, complémentaires de facteurs volontaires et de demande (réputation, proximité avec le consommateur final et demande de biens verts)¹⁵⁵. Enfin, toutes les politiques n'auraient pas le même effet : les politiques de réglementation seraient plus défavorables à la productivité globale des facteurs des entreprises que les politiques de marché, en ligne avec l'hypothèse étroite de Porter et la théorie économique suggérant un meilleur rapport coût-efficacité des mécanismes de marché¹⁵⁶.

L'accroissement de la dépendance à certaines matières premières critiques pourrait toucher la croissance potentielle à court et long terme. La plupart des technologies vertes reposent sur le recours à des matières premières critiques comme le lithium, le nickel et le silicium. La demande pour ces intrants augmentera rapidement en ligne avec l'accélération de la transition bas-carbone, conduisant à d'éventuelles perturbations des chaînes d'approvisionnement. En plus de réduire l'utilisation des capacités productives des entreprises avec un effet négatif sur la productivité, les pénuries de matériaux, si elles persistent, peuvent conduire des entreprises à repenser leurs voies d'approvisionnement (nouveaux fournisseurs, nouvelles routes de transport, nouveaux lieux de production...). L'impact de telles réorganisations sur la productivité totale des facteurs est incertain : ces dernières pourraient générer des pertes de productivité en cas de hausse de coûts des matériaux critiques (qui se transmet à l'inflation globale mais aussi sous-jacente)¹⁵⁷, notamment pour des secteurs dont la productivité a bénéficié de leur exposition internationale et de la mondialisation, ou des gains si elles conduisent les entreprises à optimiser leurs chaînes de valeur mondiales¹⁵⁸. L'agence internationale de l'énergie¹⁵⁹ anticipe pour les prochaines années d'éventuelles contraintes d'offre pour certains intrants (lithium chimique, nickel de qualité batteries et terres rares). Par ailleurs, les capacités minières actuelles (y compris les projets en cours) ne permettraient de répondre qu'à la moitié des besoins mondiaux en lithium et en cobalt d'ici 2030 dans un scénario de respect des objectifs climatiques. En parallèle, la réduction de la dépendance aux énergies fossiles atténuerait l'impact sur la croissance potentielle des chocs d'offre qui sont liés au fossile¹⁶⁰.

Peu de travaux empiriques ont pour objet d'étude l'impact de la transition bas-carbone sur la croissance potentielle et la productivité au niveau agrégé. Une étude micro-économétrique suggère que l'impact d'un resserrement de politique environnementale sur la productivité multifactorielle agrégée des pays faiblement émetteurs de GES dont la France fait partie (soit la moitié d'un échantillon de 15 pays de la zone euro ayant les ratios d'émissions de GES par habitant les plus faibles) serait proche de zéro,

¹⁵² André *et al.* (2023), *op. cit.*

¹⁵³ Benatti *et al.* (2023), *op. cit.*

¹⁵⁴ Albrizio *et al.* (2017), *op. cit.*

¹⁵⁵ Anyfantaki *et al.* (2024), *op.cit.* D'après une étude sur les déterminants de l'innovation verte auprès d'entreprises, données du Community Innovation Survey de 2020.

¹⁵⁶ Benatti *et al.* (2023), OCDE (2021), *op. cit.*

¹⁵⁷ Miranda-Pinto J., Pescatori A., Stuermer M. et Wang X. (2024), "Beyond energy: inflationary effects of metal price shocks in production networks", FMI, *Working Papers*, n° 2024215.

¹⁵⁸ Le Roux J. (2022), "How persistent supply chain disruptions could affect euro area potential output", BCE, *Economic Bulletin*, Issue 1/2022.

¹⁵⁹ Agence internationale de l'énergie (2021), "The role of critical minerals in clean energy transitions", World energy Outlook Special Report.

¹⁶⁰ Le Roux J., Szörfi B. et Weissler M. (2022), "How higher oil prices could affect euro area potential output", BCE, *Economic Bulletin*, Issue 5/2022.

voire faiblement positif tandis que la productivité agrégée des entreprises des pays fortement émetteurs serait négativement touchée¹⁶¹. Les études de l'impact de la transition sur la croissance potentielle (pouvant transiter par le biais, non pas seulement de la PGF, mais également des autres composantes de la croissance) sont encore plus rares. Des travaux récents de la BCE¹⁶² sur des données macroéconomiques de 29 pays européens sur la période 1985-2021, suggèrent que les politiques de tarification du carbone n'ont jusqu'à présent pas eu d'effet significatif négatif sur le PIB potentiel en Europe. Il convient toutefois de rappeler que l'estimation porte sur une période pendant laquelle la tarification carbone était faible, malgré quelques exceptions nationales, et a augmenté graduellement. Ces résultats rejoignent ceux de Metcalf et Stock (2020)¹⁶³ sur la croissance effective.

Certains modèles avec progrès technique endogène permettent d'appréhender l'impact de la tarification explicite du carbone sur la productivité et la croissance. Toutefois, la très grande majorité des articles ne tient compte que de la réorientation de la R&D, d'un objectif d'amélioration de l'utilisation des facteurs de production à un objectif d'efficacité énergétique¹⁶⁴. Ces articles concluent ainsi à une diminution, généralement transitoire, de la croissance potentielle. Par exemple, en France, cette diminution pourrait atteindre 0,3 point de pourcentage par an en moyenne sur 45 ans avec un effet persistant à long terme dans le cas de la mise en place d'une taxe carbone permettant la réduction des émissions de CO₂ de 75 % à un horizon de 40 ans, en cohérence avec les travaux de la commission Quinet, dont les recettes sont reversées sous forme de subventions à la R&D¹⁶⁵. Des modèles d'équilibre général dynamique et stochastique avec une dynamique d'entrée-sortie des entreprises en fonction de leur productivité idiosyncrasique ont également pu être utilisés, et conduisent également à une baisse de l'activité¹⁶⁶. En outre, ces deux types de modélisation donnent *a priori* une estimation incomplète de l'impact de la transition bas-carbone sur la productivité globale des facteurs : ces analyses ne tiennent pas compte des effets d'entraînement de l'innovation verte sur le reste de l'économie, des transferts de connaissance internationaux ou d'une évolution endogène des dépenses en R&D. Par conséquent, la baisse de la productivité pourrait être moins prononcée.

¹⁶¹ Benatti et al. (2023), *op. cit.* L'analyse des données agrégées au niveau des pays permet de considérer l'entière population d'entreprises et leurs entrées et sorties mais pourrait toutefois souffrir de biais d'agrégation et d'endogénéité poussant les auteurs à répliquer l'analyse au niveau des entreprises (*cf. supra*).

¹⁶² Parker (2023), *op. cit.*

¹⁶³ Metcalf G. et Stock J. H. (2020), "Measuring the macroeconomic impact of carbon taxes", *AEA Papers and Proceedings*, 110:101-06.

¹⁶⁴ Voir Henriët F., Maggiar N. et Schubert K. (2014), "A stylized applied energy – Economy model for France", *The Energy Journal*, vol. 35(4), p. 1-37 pour la France ; et Hassler J., Krusell P. et Olovsson C. (2021), "Directed Technical Change as a Response to Natural Resource Scarcity", *Journal of Political Economy*, vol. 129 (11), p. 3039-3072 et Fried S. (2018), "Climate policy and innovation: a quantitative macroeconomic analysis", *American Economic Journal: Macroeconomics*, vol. 10(1), p. 90-118 pour les États-Unis.

¹⁶⁵ Henriët et al. (2014), *op.cit.* La taxe carbone simulée a une valeur initiale de 64 €/tCO₂ et croît pour permettre une baisse des émissions de 75 %. L'impact est calculé par rapport à un sentier de croissance équilibrée, sans prise en compte des coûts générés par le changement climatique. Ce chiffrage a été adapté par la mission Jean Pisani-Ferry et Selma Mahfouz pour l'évaluation macroéconomique présentée dans le rapport de synthèse. La chronique de baisse de la croissance potentielle a été modifiée, pour davantage mettre l'accent sur les coûts de réallocation des facteurs de production au sein des entreprises (plutôt que la réallocation de la R&D à proprement parler) : la perte de croissance était de 0,3 p.p. entre 2024 et 2030, de 0,2 p.p. entre 2031 et 2035 et de 0,1 p.p. entre 2036 et 2040.

¹⁶⁶ Jondeau E., Levieuge G., Sahuc J.-G. et Vermandel G. (2023), "Environmental subsidies to mitigate net-zero transition costs", Banque de France, *Working Papers*, n° 910, développe ce type de modèle DSGE au niveau mondial avec un module environnemental fruste où la neutralité carbone est atteinte grâce à une taxe carbone dont les recettes sont redistribuées aux entreprises « vertes ».

2. Modèle Mouette

2.1 Motivation

La transition bas-carbone implique la substitution des énergies fossiles par des énergies décarbonées, des gains d'efficacité énergétique, et la sobriété¹⁶⁷. Cette transition est permise par la réorientation du progrès technique vers des technologies vertes et par des investissements supplémentaires (dans la décarbonation et dans l'efficacité énergétique), et permet la sortie complète des énergies fossiles.

Comme le souligne la partie précédente, les politiques de décarbonation auraient un effet négatif sur la croissance de la productivité pendant la phase de transition, mais pourraient générer des gains supplémentaires à long terme via l'innovation verte. Cette moindre croissance résulterait principalement d'une hausse des coûts de production et d'une réorientation de la R&D vers la décarbonation et vers l'efficacité énergétique. Sur ce deuxième canal, la rigidité de l'offre de R&D implique un important risque d'éviction d'une hausse de la R&D verte au détriment du progrès technique améliorant la productivité des facteurs, même dans le cadre d'une transition ordonnée et prévisible. À long terme, la transition bas-carbone pourrait générer de nouveaux gains de productivité, par le biais des marges intensives (amélioration des processus de production) et extensives (sélection des entreprises les plus performantes), ainsi que par l'innovation verte, qui pourrait permettre un retour sur le sentier de croissance prévalant avant la transition. Cette partie explore ce canal d'éviction de la R&D productive, qui devrait être le canal de plus grande ampleur pendant la phase de transition. La partie 3 discute, quant à elle, du canal du surcoût des investissements en décarbonation et des enjeux autour de la réorganisation de l'appareil productif.

Le rapport de la mission Pisani-Ferry – Mahfouz concluait à un ralentissement de la productivité du travail¹⁶⁸ transitant par le canal d'éviction de la R&D au profit de l'efficacité énergétique de l'ordre de 0,3 point de pourcentage par an jusqu'en 2050. Ce chiffrage s'appuyait sur le modèle stylisé de l'économie française de Henriët, Maggiar et Schubert (2014)¹⁶⁹ dans lequel la R&D est modélisée explicitement, laquelle vise à améliorer l'efficacité de l'appareil productif ou à générer des gains d'efficacité énergétique (cf. Encadré 2 pour une présentation du modèle). Néanmoins, ce modèle ne comporte qu'un seul type d'énergie consommé par les ménages et les entreprises, l'énergie brune, et ne tient donc pas compte des possibilités de substitution entre énergies brune et verte¹⁷⁰, des éventuelles externalités positives entre différents types de R&D et entre zones géographiques (l'effort d'innovation pouvant alors être réparti entre ces différentes zones), ou encore de la possibilité d'un accroissement endogène des dépenses totales d'investissements en R&D. Ainsi, comme souligné dans le rapport thématique sur la productivité de la mission Pisani-Ferry – Mahfouz, pour une cible de décarbonation du mix énergétique donnée, les résultats obtenus avec ce modèle constituent une borne haute des pertes de productivité pouvant être attendues de la réallocation au sein de la R&D.

¹⁶⁷ Pisani-Ferry J. et Mahfouz S. (2023), *op. cit.*

¹⁶⁸ Pisani-Ferry J. et Mahfouz S. (2023), *op. cit.*

¹⁶⁹ Henriët F. *et al.* (2014), *op. cit.*

¹⁷⁰ Dans toute cette deuxième partie, l'« énergie verte » désigne l'énergie décarbonée, tandis que l'« énergie » brune désigne l'énergie carbonée. Ainsi tenir compte des possibilités de substitution entre énergie brune et verte conduit à diminuer le besoin de réallocation de chercheurs du secteur productif vers le secteur énergétique, puisqu'une partie de la baisse de consommation d'énergie fossile se fait en basculant vers de la consommation d'énergie verte.

Encadré 2 : Fonctionnement et utilisations du modèle d'Henriet *et al.* (2014)

Dans l'article d'Henriet *et al.* (2014)¹⁷¹, l'économie française est modélisée de manière stylisée. Elle est représentée par une économie ouverte produisant un bien générique, qui peut être consommé ou investi. Le modèle intègre une utilisation de combustibles bruns (importés) tant du côté des ménages que des entreprises et deux types de progrès technique, respectivement en matière de travail et d'économie d'énergie. L'effort de recherche total de l'économie est une proportion donnée et exogène de la production. Néanmoins, l'allocation de ce montant entre les deux secteurs de recherche susmentionnés, et donc l'évolution des deux progrès techniques correspondants, est endogène, et une augmentation du prix de l'énergie (due à un choc d'offre exogène ou à un ajustement de la fiscalité environnementale) induit une augmentation des dépenses de R&D visant à économiser l'énergie au détriment de la R&D visant à augmenter la productivité du travail.

Cette modélisation induit un compromis entre croissance économique¹⁷² et transition énergétique. En effet, des dépenses élevées en R&D visant à accroître la productivité du travail (par exemple *via* l'amélioration des technologies de l'information et de la communication) garantissent un taux de croissance élevé de l'économie mais entraînent une moindre croissance des gains d'efficacité énergétique, se traduisant par des émissions de CO₂ plus élevées. À l'inverse, des dépenses en R&D permettant des économies d'énergie réduisent les émissions de CO₂ plus que ne le permettraient les possibilités de substitution entre énergie et travail, mais ralentissent la croissance économique.

Dans leur article, Henriet *et al.* (2014) tentent de déterminer les politiques nécessaires pour atteindre des cibles de réduction d'émission (et donc de consommation énergétique). Ils simulent ainsi quatre scénarios : 1) une évolution de la taxe carbone telle que recommandée par le Rapport Quinet de 2009 (c'est-à-dire une augmentation de la taxe de 15 % au départ puis une croissance de celle-ci de 4 % par an) qui ne permet de réduire les émissions liées à la consommation d'énergie brune que de 40 %, 2) un choc pétrolier permettant une réduction de la consommation énergétique de même ampleur (les recettes fiscales redistribuées sont moindres et les pertes de bien-être plus élevées qu'avec la taxe), 3) la combinaison d'une taxe carbone telle que recommandée par le rapport Quinet de 2009 et des subventions de 20 % au profit de la R&D en efficacité énergétique et enfin 4) une taxe permettant d'atteindre une diminution de 75 % des émissions de CO₂ à horizon 2050. Ce dernier scénario et ses conclusions ont été repris par le rapport sur la productivité de la mission Pisani-Ferry-Mahfouz estimant ainsi des pertes de croissance de la productivité de 0,3 p.p. par an en moyenne pendant 40 ans.

Plus récemment, dans l'article d'Oliu-Barton *et al.* (2024)¹⁷³, le modèle a été utilisé pour étudier les effets comparés d'une taxe sur les produits bruns et de changements de préférences en faveur des biens verts.

¹⁷¹ Le modèle d'Henriet *et al.* (2014), est proche de celui développé par Hassler *et al.* (2021), *op. cit.* Ils développent en effet un modèle d'équilibre général à croissance endogène pour étudier l'évolution de deux sources de progrès technique, sur l'énergie et sur la combinaison des facteurs capital et travail, entre lesquelles ils supposent par ailleurs une substituabilité faible à court terme. Ainsi, la fonction de production du modèle, de type CES, agrège trois facteurs de production de façon imbriquée : le travail et le capital sont définis à l'aide d'une fonction Cobb-Douglas avec un facteur de productivité, et se combinent avec l'énergie, également augmentée d'un second facteur de productivité. Les auteurs se placent dans un cadre néo-classique en économie fermée où un consommateur final consomme un bien de production produit par les entreprises à partir de la fonction de production. Les deux facteurs de progrès technique évoluent de façon endogène en fonction de l'allocation d'un facteur de R&D, qui dépend de l'évolution des prix relatifs des facteurs de production. Si les prix de l'énergie augmentent relativement plus vite que ceux du travail et du capital, le progrès technique associé à ce facteur accélère pour en limiter l'impact. Les résultats du modèle sont largement conditionnés par la spécification de la fonction de production. Le choix de ne pas retenir ce modèle s'explique par le fait qu'il a été calibré sur les États-Unis et qu'il ne modélise pas de fiscalité explicite, ce qui ne permet pas d'en étudier l'impact sur le progrès technique. Dans la littérature, un modèle à croissance endogène alternatif est développé dans Fried S. (2018), "Climate Policy and Innovation: A Quantitative Macroeconomic Analysis", *American Economic Journal*, lequel présente la particularité d'intégrer des externalités entre différents types de R&D. Ce modèle est discuté dans la partie 4.2.2 *infra*.

¹⁷² Dans le modèle d'Henriet *et al.* (2014), « L'économie croît à long terme au même taux que l'efficacité du travail ».

¹⁷³ Oliu-Barton M., Pommeret A., Robinet A., Schubert K., Viennot M. (2024), « La sobriété énergétique choisie : chocs de préférences et biais comportementaux », *Économie et statistique*, n° 543.

Un nouveau modèle stylisé à croissance endogène pour la France (cf. Encadré 3), Mouette (MOdèle Utile à l'Évaluation des Trajectoires de Transition Énergétique), a donc été développé à la DG Trésor.

Encadré 3 – Modèles à croissance endogène

Les modèles à croissance exogène, issus de la théorie de Robert Solow¹⁷⁴, considèrent que la croissance économique dépend d'abord de l'utilisation des facteurs de production, capital et travail. La part restant inexpliquée provient alors de facteurs extérieurs à la production, comme la croissance démographique ou le progrès technique qui sont exogènes (leur origine n'est pas explicitée). La théorie de la croissance endogène, initiée par Paul Romer¹⁷⁵, considère quant à elle que la croissance de l'économie est déterminée par des facteurs internes au système économique. Elle invoque différentes sources de croissance, parmi lesquelles :

- Le capital humain, en considérant que l'éducation et l'acquisition de compétences accroissent l'efficacité des processus productifs.
- L'existence de biens publics productifs, comme les infrastructures de transport ou de communication, favorisant la croissance.
- Les avancées technologiques issues de la R&D, avec deux approches possibles, selon que ces avancées permettent d'accroître directement la production par des innovations de produit ou d'améliorer l'utilisation des facteurs de production par des innovations de procédé. Le modèle Mouette intègre cette deuxième approche.

2.2. Présentation générale du modèle Mouette

Le modèle Mouette reprend le modèle stylisé issu du travail de Henri et al. (2014) qui modélise la croissance du progrès technique de façon endogène au sens où les investissements en R&D (visant à améliorer la productivité du travail ou l'efficacité énergétique) sont guidés par les profits relatifs des deux secteurs de recherche sous-jacents. Ainsi, une augmentation du prix de l'énergie (due par exemple à l'introduction d'une taxe carbone) conduit à des investissements en R&D pour améliorer l'efficacité énergétique, au détriment de la R&D augmentant la productivité du travail, la part totale de la recherche dans le PIB étant constante et exogène dans ce modèle. Une des principales nouveautés consiste en l'introduction de la distinction entre énergies verte et brune afin de modéliser de manière explicite les possibilités de substitution entre ces deux énergies. Ainsi, Mouette intègre une distinction de la consommation dans ces deux énergies, tant du côté des ménages que des entreprises, et trois types de progrès technique (soit un de plus que le modèle initial), respectivement en matière de travail, d'énergie verte et d'énergie brune. Dans ce modèle, lorsque le prix de l'énergie brune augmente (par exemple à la suite de l'augmentation de la taxe carbone), sa consommation est en partie substituée par l'utilisation d'énergie verte, ce qui atténue les effets d'éviction susmentionnés sur l'efficacité du travail. Ce type de modèle propose une représentation simplifiée de l'économie, afin de pouvoir se concentrer sur les implications de la transition énergétique sur le progrès technique et les possibles effets d'éviction de l'amélioration de l'efficacité énergétique sur la croissance de l'efficacité du travail. Les sorties de ce modèle, qui intègre de manière explicite l'évolution de la productivité du travail et de l'efficacité énergétique, peuvent ainsi être utilisées pour calibrer des chocs exogènes dans ThreeME.

2.2.1 Ménages

Dans Mouette, de façon analogue au modèle d'Henri et al. (2014), les ménages sont représentés par un agent représentatif, sans contrainte de financement, consommant des biens de trois types : non durable N_t , énergétique E_t (vert ou brun) et durable D_t . Contrairement aux biens non durables et à l'énergie qui

¹⁷⁴ Solow R. M. (1956), "A Contribution to the Theory of Economic Growth", *The Quarterly Journal of Economics*.

¹⁷⁵ Romer P. (1990), "Endogenous Technological Change", *Journal of Political Economy*.

sont consommés en une période, les biens durables suivent un processus d'accumulation formalisé de la façon suivante :

$$D_t = (1 - \delta_t)D_{t-1} + X_t$$

où X_t représente l'investissement en biens durables à la période t et δ_t le taux de dépréciation.

L'utilité des ménages dépend de leur consommation de biens non durables N_t et des services fournis par la combinaison du stock de biens durables D_t au début de la période et de l'énergie E_t consommée au cours de cette période :

$$U(N_t, D_t, E_t) = U(C_t)$$

La consommation totale des ménages est une fonction à élasticité de substitution constante, dite CES imbriquée :

$$C_t = \left(\gamma N_t^{\frac{\omega-1}{\omega}} + (1-\gamma)Z_{h,t}^{\frac{\omega-1}{\omega}} \right)^{\frac{\omega}{\omega-1}}$$

Où γ est un paramètre de pondération qui mesure la part des biens non durables dans la consommation des ménages, ω mesure l'élasticité de substitution entre les biens non durables et $Z_{h,t}$, qui représente ici un agrégat des services fournis par i) le stock de biens durables D_t possédés par les ménages en début de période ii) et de la consommation d'énergie efficace $AeE_{h,t}$:

$$Z_{h,t} = \left(\nu D_{t-1}^{\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}} + (1-\nu)(AeE_{h,t})^{\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}} \right)^{\frac{\varepsilon}{\varepsilon-1}}$$

Où Ae représente l'efficacité énergétique, ν est un paramètre de pondération qui détermine la contribution des biens durables à l'agrégat $Z_{h,t}$ et ε est l'élasticité de substitution entre les biens durables et la consommation énergétique efficace.

La substituabilité entre énergie verte E_{vh} et énergie brune E_{fh} pour les ménages est capturée par le paramètre ζ qui modélise l'élasticité de substitution entre ces deux types d'énergie. f est un paramètre de pondération qui mesure la part de l'énergie fossile efficace dans l'agrégat énergétique consommé par les ménages.

$$\text{Ainsi : } AeE_{h,t} = \left[f \cdot (A_t^{ef} E_{fh,t})^{\frac{\zeta-1}{\zeta}} + (1-f)(A_t^{ev} E_{vh,t})^{\frac{\zeta-1}{\zeta}} \right]^{\frac{\zeta}{\zeta-1}}$$

La présence des paramètres d'efficacité énergétique A_t^{ef} et A_t^{ev} dans cette équation traduit l'hypothèse d'une diffusion du progrès technique améliorant l'efficacité énergétique des entreprises vers les ménages.

$Z_{h,t}$ peut alors se réécrire :

$$Z_{h,t} = \left(\nu D_{t-1}^{\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}} + (1-\nu) \left[f(A_t^{ef} E_{fh,t})^{\frac{\zeta-1}{\zeta}} + (1-f)(A_t^{ev} E_{vh,t})^{\frac{\zeta-1}{\zeta}} \right]^{\frac{\zeta}{\zeta-1}} \right)^{\frac{\varepsilon}{\varepsilon-1}}$$

Enfin, dans la modélisation de l'évolution du stock de biens durables, il est fait l'hypothèse de l'existence de coûts d'ajustement ($AC_{h,t}$). Ces coûts capturent les externalités négatives temporaires liées par exemple

à l'installation, aux délais de livraison *etc.* Suivant la spécification standard de la littérature (voir notamment Henriet *et al.*, 2014), une forme fonctionnelle convexe par rapport au taux de variation du stock est retenue. Ainsi :

$$AC_{h,t} = \frac{\kappa^d}{2} \left((1 + g_t^{al}) D_{t-1} \left(\frac{D_t}{(1 + g_t^{al}) D_{t-1}} - 1 \right)^2 \right)$$

Où g_t^{al} est le taux de croissance de la productivité du travail. Cependant, comme dans Henriet *et al.* (2014), il est fait l'hypothèse que ces coûts d'ajustement sont nuls ($\kappa^d = 0$)¹⁷⁶.

Le programme de maximisation du ménage représentatif, consistant à maximiser son utilité, est donc le suivant (avec μ le taux d'actualisation) :

$$\max_{E_{hv,t} E_{hf,t} D_t N_t} \sum_{t=1}^{\infty} \left(\frac{1}{(1 + \mu)^t} \right) U(C_t)$$

Sous la contrainte de revenu suivante :

$$\sum_{t=1}^{\infty} \frac{(1 + \tau_t^c)(P_t^n N_t + P_t^x X_t) + (P_t^{ef} + \tau_{hf,t})E_{hf,t} + (P_t^{ev} + \tau_{hv,t})E_{hv,t} + P_t^d AC_{h,t}}{\prod_{s=1}^t (1 + r_s)} \\ = B_0 + \sum_{t=1}^{\infty} \frac{(P_t^t L_t + T_t)}{\prod_{s=1}^t (1 + r_s)}$$

Avec τ^c , τ_{hf} et τ_{hv} les taxes sur la consommation respective de biens, d'énergie fossile et d'énergie verte des ménages, P^n , P^{ef} et P^{ev} leurs prix respectifs, $P^t L_t$ la rémunération du travail de l'agent, T_t les transferts du gouvernement et P_t^d le coût d'utilisation du stock de biens durables.

La condition d'absence de jeu de Ponzi : $\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{B_t}{\prod_{s=1}^t (1 + r_s)} = 0$ empêche le ménage représentatif de s'endetter à l'infini et implique que la valeur présente de sa consommation est égale à sa richesse. Ainsi, B_t désigne la valeur nominale des obligations détenues au début de la période $t+1$.

La fonction d'utilité est identique à celle de Henriet *et al.* (2014) :

$$U(C_t) = \ln(C_t)$$

L'offre de travail L n'intervient pas dans la fonction d'utilité et est donc exogène.

Le prix du stock de biens durables P_t^d , dans lequel sont introduits des coûts d'ajustement quadratiques, issu de Henriet *et al.* (2014), correspond au coût d'usage d'une unité supplémentaire de biens durables détenue par les ménages. Le prix du stock de biens durables s'explique alors ainsi :

$$P_t^d = P_t^x \left((1 + \tau^c) \left(\frac{1 + r_t}{1 + \pi_t^x} - (1 - \delta^d) \right) + \kappa^d \left(-\frac{1}{2} (1 + g_t^{al}) \left(\left(\frac{D_t}{(1 + g_t^{al}) D_{t-1}} \right)^2 - 1 \right) + \right. \right. \\ \left. \left. \frac{1 + r_t}{1 + \pi_t^x} \left(\frac{D_{t-1}}{(1 + g_{t-1}^{al}) D_{t-2}} - 1 \right) \right) \right), \text{ avec } \pi_t^x = \frac{P_t^x}{P_{t-1}^x} - 1$$

¹⁷⁶ Dans le cas où le coefficient est positif, l'ajustement du stock de biens durables aux chocs économiques se fait plus progressivement.

Le terme $\frac{1+r_t}{1+\pi_t^x}$ mesure le rendement réel auquel les ménages renoncent lorsqu'ils consacrent une unité de richesse à l'achat d'un bien durable plutôt qu'à un placement financier ; il s'agit du coût financier de la détention du stock de biens durables. Le terme $(1 - \delta^d)$ représente la part du bien durable qui subsiste à la période suivante après dépréciation. Le facteur $(1 + \tau^c)$ reflète le fait que les ménages acquittent une taxe sur la consommation lors de l'achat de biens durables : cette fiscalité augmente directement le coût d'acquisition et donc le prix du stock de biens durables. Le terme κ^d provient de l'hypothèse selon laquelle les ménages supportent un coût lorsqu'ils modifient rapidement et de façon significative leur stock de biens durables. Le coût dépend du rythme de croissance du stock de biens durables relativement à son sentier de croissance équilibrée, mesuré par $\left(\frac{D_t}{(1+g_t^{dl})D_{t-1}}\right)$. Lorsque ce ratio s'écarte de l'unité, les ménages augmentent ou réduisent leur stock plus rapidement que sur le sentier de croissance équilibrée, ce qui génère un coût supplémentaire. En pratique, κ^d est un coût d'ajustement nul dans les simulations, comme dans celles de Henriet *et al.* (2014).

Les conditions du premier ordre du programme de maximisation du ménage représentatif induisent les relations suivantes :

$$\frac{1}{1 + \mu} \left(\frac{N_t}{N_{t+1}} \right)^{\frac{1}{\omega}} \left(\frac{C_t}{C_{t+1}} \right)^{\frac{\omega-1}{\omega}} = \frac{1 + \pi_{t+1}^n}{1 + r_{t+1}}$$

avec $1 + \pi_{t+1}^n = \frac{P_{t+1}^n}{P_t^n}$, qui décrit l'arbitrage entre la consommation de biens non durables et la consommation totale ;

$$\frac{1-f}{f} \left(\frac{A_t^{ev}}{A_t^{ef}} \right)^{\frac{\zeta-1}{\zeta}} \left(\frac{E_{fh,t}}{E_{vh,t}} \right)^{\frac{1}{\zeta}} = \frac{P_t^{ev} + \tau_{hv,t}}{P_t^{ef} + \tau_{hf,t}}$$

qui décrit l'arbitrage entre la consommation d'énergie brune et d'énergie verte ;

$$\frac{(1-v)f}{v} D_t^{\frac{1}{\varepsilon}} (A E_{h,t+1})^{-\frac{1}{\varepsilon}} \left(\frac{A_{t+1}^{ef\zeta-1}}{E_{fh,t+1}} \right)^{\frac{1}{\zeta}} = \frac{(P_{t+1}^{ef} + \tau_{hf,t+1})}{P_{t+1}^d}$$

qui décrit l'arbitrage entre stock de biens durables et consommation d'énergie ;

$$\frac{(1-\gamma)(1-v)f}{\gamma} \frac{N_t^{\frac{1}{\omega}} A_t^{ef\frac{\zeta-1}{\zeta}}}{(E_{fh,t})^{\frac{1}{\zeta}}} Z_{h,t}^{-\frac{1}{\omega}} (A E_{h,t})^{-\frac{1}{\varepsilon}} = \frac{(P_t^{ef} + \tau_{hf,t})}{(1 + \tau_t^c) P_t^n}$$

qui représente un arbitrage entre les biens non durables et la consommation de biens durables et d'énergie (via l'agrégat $Z_{h,t}$).

2.2.2 Entreprises

2.2.2.1 Entreprises productrices du bien générique

Sur le plan de la production, trois types d'entreprises sont modélisés. Le premier type, en situation de concurrence parfaite, produit un bien générique¹⁷⁷ à partir de capital, de travail, d'énergie verte et d'énergie brune, ces quatre facteurs étant imparfaitement substituables.

¹⁷⁷ Le bouclage macroéconomique du modèle relie ensuite la production totale à sa répartition entre consommation domestique, investissements, besoins énergétiques et commerce extérieur. En particulier, la production répond à la demande du ménage représentatif en biens durables et non durables.

Ces producteurs utilisent ainsi des services de travail ($Y_{L,t}$) et une combinaison de capital et de services de l'énergie ($Z_{f,t}$) :

$$Y_t = \left(\alpha Y_{L,t}^{\frac{\rho-1}{\rho}} + (1-\alpha) Z_{f,t}^{\frac{\rho-1}{\rho}} \right)^{\frac{\rho}{\rho-1}}$$

Avec α la part du travail dans la production totale, ρ l'élasticité de substitution entre les services de travail et $Z_{f,t}$ qui combine capital (K_t) et services énergétiques ($Y_{E,t}$) :

$$Z_{f,t} = \left(\beta K_{t-1}^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} + (1-\beta) Y_{E,t}^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} \right)^{\frac{\sigma}{\sigma-1}}$$

$$\text{où : } Y_{E,t} = \left(b Y_{E,t}^{v\frac{\theta-1}{\theta}} + (1-b) Y_{E,t}^{f\frac{\theta-1}{\theta}} \right)^{\frac{\theta}{\theta-1}}$$

Avec $Y_{E,t}^v$ et $Y_{E,t}^f$ des services associés aux énergies vertes et brunes, β la part du capital dans $Z_{f,t}$, σ l'élasticité de substitution entre le capital et l'agrégat énergétique dans $Z_{f,t}$, b la part de l'énergie verte dans l'agrégat énergétique et θ l'élasticité de substitution entre les deux types de services énergétiques.

Le capital est ici détenu par les ménages et l'équation de dépréciation du capital est la suivante :

$$K_t = (1 - \delta_k) K_{t-1} + I_t$$

Comme pour le stock de biens durables, dans le modèle, une modification du stock de capital induit les coûts d'ajustement modélisés sous une forme quadratique qui pénalise (de manière convexe) tout écart du stock de capital (K_t) par rapport à sa trajectoire de croissance équilibrée, cette dernière étant déterminée par le taux de progrès technique (g_t^{al}). Le paramètre κ_k module l'intensité de ces frictions structurelles, introduisant une inertie qui force l'économie à lisser ses décisions d'investissement et à s'adapter graduellement aux chocs¹⁷⁸ :

$$AC_{f,t} = \frac{\kappa_k}{2} \left(\frac{K_t}{(1 + g_t^{al}) K_{t-1}} - 1 \right)^2 (1 + g_t^{al}) K_{t-1}$$

En combinant les trois expressions précédentes, l'équation de production du bien final est obtenue. À chaque date, les producteurs de biens finaux utilisent un stock homogène de capital, des services de travail et des services énergétiques pour produire des biens finaux. Les trois intrants sont des substituts imparfaits :

$$Y_t = \left(\alpha Y_{L,t}^{\frac{\rho-1}{\rho}} + (1-\alpha) \left(\beta K_{t-1}^{\frac{\rho-1}{\rho}} + (1-\beta) \left(b Y_{E,t}^{v\frac{\theta-1}{\theta}} + (1-b) Y_{E,t}^{f\frac{\theta-1}{\theta}} \right)^{\frac{\theta-1}{\theta-1} \frac{\rho-1}{\rho}} \right) \right)^{\frac{\rho}{\rho-1}}$$

Le prix du bien final est normalisé à 1, tandis que les prix des services du travail et des énergies sont notés respectivement $P_t^{Y_L}$, $P_t^{Y_E^v}$ et $P_t^{Y_E^f}$. Les producteurs de biens finaux maximisent leur profit en considérant ces prix comme donnés. Ils demandent des services de travail, des services énergétiques et du capital jusqu'au point où la productivité marginale de chaque intrant est égale à son coût.

¹⁷⁸ Les simulations sont effectuées, comme dans Henriët et al. (2014) sans coûts d'ajustement, tant du côté des biens durables que du côté du capital. Il est en effet plus facile d'atteindre l'objectif de réduction des émissions souhaité ainsi puisque l'économie est flexible et peut facilement adapter ses stocks de biens durables et de capital aux nouveaux prix de l'énergie.

Le programme de maximisation du profit intertemporel de ces entreprises est le suivant :

$$\max_{Y_{Lt}, Y_{Et}^f, Y_{Et}^v} \sum_{t=1}^{\infty} \frac{P_t^y Y_t - P_t^{Y_L} Y_{Lt} - P_t^i (I_t + AC_t) - (P_t^{Y_E^f} + \tau_{f,t}) Y_{Et}^f - (P_t^{Y_E^v} + \tau_{v,t}) Y_{Et}^v}{\prod_1^t (1 + r_s)}$$

Sous la double contrainte d'accumulation du capital :

$$K_t = (1 - \delta_k) K_{t-1} + I_t$$

Et de coût d'ajustement dans son accumulation :

$$AC_{f,t} = \frac{\kappa_k}{2} \left(\frac{K_t}{(1 + g_t^{al}) K_{t-1}} - 1 \right)^2 (1 + g_t^{al}) K_{t-1}$$

Les entreprises choisissent leur stock de capital de façon à ce que le produit marginal du capital soit égal à son coût marginal. En notant P_t^k le coût d'usage du capital :

$$P_t^k = P_t^i \left(\frac{1 + r_t}{1 + \pi_t^i} - (1 - \delta_k) \right) + \kappa_k \left(\frac{1 + r_t}{1 + \pi_t^i} \left(\frac{K_{t-1}}{(1 + g_t^{al}) K_{t-2}} - 1 \right) - \frac{1}{2} \left(\left(\frac{K_{t-1}}{(1 + g_t^{al}) K_{t-2}} \right)^2 - 1 \right) (1 + g_t^{al}) \right)$$

Le terme $\frac{1 + r_t}{1 + \pi_t^i}$ représente le coût d'opportunité de l'investissement : il correspond au rendement qu'aurait procuré un placement alternatif. Le terme $(1 - \delta_k)$ correspond à la valeur résiduelle du capital après dépréciation. Le terme en κ_k reflète les coûts d'ajustement du stock de capital. Lorsque l'entreprise augmente ou réduit rapidement son stock de capital, elle supporte un coût supplémentaire qui accroît le coût marginal d'une unité de capital installée. Ces coûts d'ajustement introduisent une inertie dans l'investissement et empêchent le stock de capital de s'ajuster instantanément à son niveau optimal après un choc.

De la résolution de ce problème, il en résulte les trois conditions d'équilibre suivantes portant sur les demandes relatives en services des différents secteurs (énergies et travail) :

$$\begin{aligned} \frac{Y_{Et}^f}{Y_{Et}^v} &= \left(\frac{(1 - b) P_t^{Y_E^v}}{b P_t^{Y_E^f}} \right)^\theta \quad (*) \\ \frac{Y_{Lt}}{Y_{Et}^v} &= \frac{\alpha^\rho}{((1 - \alpha)(1 - \beta)b)^\theta} \frac{(P_t^{Y_E^v})^\theta}{(P_t^{Y_L})^\rho} \left(\frac{Y_{Et}}{Y_{Et}^v} \right)^{\frac{\rho - \theta}{\rho}} \\ \frac{P_t^{Y_E^f}}{P_t^k} &= \frac{(1 - b)(1 - \beta)}{\beta} \left(\frac{K_{t-1}}{Y_{Et}} \right)^{\frac{1}{\rho}} \left(\frac{Y_{Et}}{Y_{Et}^f} \right)^{\frac{1}{\theta}} \end{aligned}$$

Ces demandes relatives sont donc fonctions de leurs prix relatifs.

2.2.2.2 Entreprises productrices de services intermédiaires

Le secteur intermédiaire produit des services de travail, d'énergie verte et d'énergie brune (fossile). Ces services sont obtenus en combinant travail ou énergie bruts avec un continuum (j) de machines spécifiques

à un secteur, notés x_j de qualité A_t^l, A_t^{ev} ou A_t^{ef} . Il est supposé que le paramètre caractérisant cette combinaison λ , est le même pour les services de travail et d'énergie. Cette hypothèse n'est faite que par souci de simplification, comme dans le modèle d'Henriet *et al.* (2014). Les fonctions de productions sont ainsi les suivantes :

$$Y_{Et}^f = E_{ft}^{1-\lambda} \int_0^1 (A_{jt}^{ef})^{1-\lambda} (x_{jt}^{ef})^\lambda dj$$

$$Y_E^v = E_{vt}^{1-\lambda} \int_0^1 (A_{jt}^{ev})^{1-\lambda} (x_{jt}^{ev})^\lambda dj$$

$$Y_{Lt} = L_t^{1-\lambda} \int_0^1 (A_{jt}^l)^{1-\lambda} (x_{jt}^l)^\lambda dj$$

Il est donc supposé qu'il existe des machines de quatre types : des machines polyvalentes, dont le stock total est K_t , et des machines spécifiques aux trois secteurs de R&D. Ces machines sont toutes produites à partir du bien final uniquement.

Le producteur de services d'énergie brune maximise son profit, c'est-à-dire les recettes liées aux services d'énergie brune produits auxquelles sont retranchées le coût de l'énergie brune brute ($P_t^{Y_E^f} E_{ft}$) et du continuum de machines spécifiques au secteur ($\int_0^1 P_{jt}^{ef} x_{jt}^{ef} dj$) utilisées pour produire ces services, selon le programme de maximisation suivant :

$$\max_{x_{jt}^{ef}} P_t^{Y_E^f} E_{ft}^{1-\lambda} \int_0^1 (A_{jt}^{ef})^{1-\lambda} (x_{jt}^{ef})^\lambda dj - P_t^{Y_E^f} E_{ft} - \int_0^1 P_{jt}^{ef} x_{jt}^{ef} dj$$

Ce qui donne :

$$x_{jt}^{ef} = \left(\frac{\lambda P_t^{Y_E^f}}{P_{jt}^{ef}} \right)^{\frac{1}{1-\lambda}} A_{jt}^{ef} E_{ft}$$

$$P_t^{Y_E^f} Y_E^f = \frac{1}{1-\lambda} P_t^{ef} E_f$$

De manière similaire, pour les services d'énergie verte :

$$x_{jt}^{ev} = \left(\frac{\lambda P_t^{Y_E^v}}{P_{jt}^{ev}} \right)^{\frac{1}{1-\lambda}} A_{jt}^{ev} E_{vt}$$

$$P_t^{Y_E^v} Y_{Et}^v = \frac{1}{1-\lambda} P_t^{ev} E_{vt}$$

Et pour les services de travail :

$$x_{jt}^l = \left(\frac{\lambda P_t^{Y_L}}{P_{jt}^l} \right)^{\frac{1}{1-\lambda}} A_{jt}^l L_t$$

$$P_t^{Y_L} Y_{Lt} = \frac{1}{1-\lambda} P_t^l L_t$$

2.2.2.3 Entreprises de R&D

Enfin, au troisième niveau, des entreprises de R&D, en concurrence monopolistique, produisent des machines spécialisées à partir du bien générique. Ces machines permettent d'accroître la productivité du travail (technologies de l'information et de la communication par exemple), l'efficacité énergétique verte ou l'efficacité énergétique brune.

La production d'une unité de machines coûte c unités du bien final et l'on obtient finalement, pour les services du travail :

$$\max_{P^l_{jt}} \pi^l_{jt} = (P^l_{jt} - c)x^l_{jt}$$

$$\text{Tel que : } x^l_{jt} = \left(\frac{\lambda P^l_{jt} Y^L}{P^l_{jt}} \right)^{\frac{1}{1-\lambda}} A^l_{jt} L_t$$

La condition de premier ordre est la suivante :

$$P^l_{jt} = \frac{c}{\lambda}$$

Le profit est le suivant :

$$\pi^l_{jt} = \frac{1-\lambda}{\lambda} c \left(\frac{\lambda^2 P^l_{jt} Y^L}{c} \right)^{\frac{\lambda}{1-\lambda}} A^l_{jt} L_t$$

Donc :

$$Y_{Lt} = \left(\frac{\lambda^2 P^l_{jt} Y^L}{c} \right)^{\frac{\lambda}{1-\lambda}} A^l_{jt} L_t$$

Avec la productivité moyenne des machines spécialisées :

$$A^l_t = \int_0^1 A^l_{jt} d_j$$

Et :

$$P^{Y_L}_t = \frac{1}{(1-\lambda)^{1-\lambda} \lambda^{2\lambda}} \left(\frac{P^l_t}{A^l_t} \right)^{1-\lambda} c^\lambda$$

Le prix des services du travail est ainsi une combinaison du prix effectif du travail en unités efficaces et du coût de production unitaire des intrants intermédiaires, comme dans Henriët *et al.* (2014).

Des résultats similaires sont obtenus pour les deux autres secteurs de R&D. Pour l'énergie brune :

$$Y^f_{Et} = \left(\frac{\lambda^2 P^f_{Et} Y^f_E}{c} \right)^{\frac{\lambda}{1-\lambda}} A^{ef}_{Et} E_{ft}$$

Et :

$$P^{Y^f_E}_t = \frac{1}{(1-\lambda)^{1-\lambda} \lambda^{2\lambda}} \left(\frac{P^{ef}_t + \tau_{ft}}{A^{ef}_t} \right)^{1-\lambda} c^\lambda \quad (**)$$

Pour l'énergie verte :

$$Y_{Et}^v = \left(\frac{\lambda^2 P_t^{Y_E^v}}{c} \right)^{\frac{\lambda}{1-\lambda}} A_t^{ev} E_{vt}$$

Et :

$$P_t^{Y_E^v} = \frac{1}{(1-\lambda)^{1-\lambda} \lambda^{2\lambda}} \left(\frac{P_t^{ev} + \tau_{vt}}{A_t^{ev}} \right)^{1-\lambda} c^\lambda \quad (***)$$

Les prix relatifs des services énergétiques sont alors (en utilisant (**)) et (***) :

$$\frac{P_t^{Y_E^f}}{P_t^{Y_E^v}} = \left(\frac{P_t^{ef} + \tau_{ft} A_t^{ev}}{P_t^{ev} + \tau_{vt} A_t^{ef}} \right)^{1-\lambda} \quad (****)$$

Et on a :

$$\frac{Y_{Et}^f}{Y_{Et}^v} = \left(\frac{P_t^{Y_E^f}}{P_t^{Y_E^v}} \right)^{\frac{\lambda}{1-\lambda}} \frac{A_t^{ef} E_{ft}}{A_t^{ev} E_{vt}}$$

Donc, en utilisant (*) :

$$\frac{A_t^{ef} E_{ft}}{A_t^{ev} E_{vt}} = \left(\frac{1-b}{b} \right)^\theta \left(\frac{P_t^{Y_E^v}}{P_t^{Y_E^f}} \right)^{\theta + \frac{\lambda}{1-\lambda}}$$

Et finalement, avec (****) :

$$\frac{A_t^{ef} E_{ft}}{A_t^{ev} E_{vt}} = \left(\frac{(1-b)}{b} \right)^\theta \left(\frac{(P_t^{ev} + \tau_{vt}) A_t^{ef}}{(P_t^{ef} + \tau_{ft}) A_t^{ev}} \right)^{(1-\lambda)\theta + \lambda} \quad (*****)$$

De manière analogue au secteur de la R&D en productivité du travail, les profits s'écrivent :

$$\Pi_{jt}^{ef} = (1 + \tau_{ft}^r) \frac{1-\lambda}{\lambda} c \left(\frac{\lambda^2 P_t^{Y_E^f}}{c} \right)^{\frac{1}{1-\lambda}} A_{jt}^{ef} E_{ft}$$

$$\Pi_{jt}^{ev} = (1 + \tau_{vt}^r) \frac{1-\lambda}{\lambda} c \left(\frac{\lambda^2 P_t^{Y_E^v}}{c} \right)^{\frac{1}{1-\lambda}} A_{jt}^{ev} E_{vt}$$

où τ_{vt}^r (respectivement τ_{ft}^r) est la subvention accordée au secteur de la recherche en énergie verte (respectivement brune).

En exprimant L_t en lien avec E_{vt} , on a :

$$\frac{A_t^l L_t}{A_t^{ev} E_v} = \frac{\alpha^\rho}{((1-\alpha)(1-\beta)b)^\theta} \left(\frac{Y_t}{Y_{Et}} \right)^{\frac{\rho-\theta}{\rho}} \left(\frac{c^\lambda}{(1-\lambda)^{1-\lambda} \lambda^{2\lambda}} \right)^{\theta-\rho} \frac{((P_t^{ev} + \tau_{vt})/A_t^{ev})^{\lambda+(1-\lambda)\theta}}{(P_t^l/A_t^l)^{\lambda+(1-\lambda)\rho}} \quad (*****)$$

Si la part du PIB allouée à la recherche est constante est exogène dans le modèle, l'allocation de cette part entre les trois secteurs de recherche est endogène. La dynamique du progrès technique est ainsi modélisée en suivant le cadre de progrès technique dirigé développé par Acemoglu *et al.* (2012)¹⁷⁹ et adapté par Henriet *et al.* (2014). L'évolution de la productivité dans chaque secteur dépend de l'allocation de l'effort de recherche et est régie par les trois équations déterministes suivantes :

$$\begin{aligned} A_t^l &= (1 + \gamma_L \eta_L sh_{t-1}^l) A_{t-1}^l \\ A_t^{ef} &= (1 + \gamma_{Ef} \eta_{Ef} sh_{t-1}^f) A_{t-1}^{ef} \\ A_t^{ev} &= (1 + \gamma_{Ev} \eta_{Ev} (1 - sh_{t-1}^l - sh_{t-1}^f)) A_{t-1}^{ev} \end{aligned}$$

γ_L , γ_{Ef} et γ_{Ev} représentent les tailles de l'innovation dans chacun des secteurs et η_L , η_{Ef} et η_{Ev} les probabilités de succès de la R&D dans chaque secteur. Ces équations peuvent se réécrire en croissance, donnant ainsi :

$$\begin{aligned} g_t^{al} &= \gamma_L \eta_L sh_{t-1}^l \\ g_t^{aef} &= \gamma_{Ef} \eta_{Ef} sh_{t-1}^f \\ g_t^{aev} &= \gamma_{Ev} \eta_{Ev} (1 - sh_{t-1}^l - sh_{t-1}^f) \end{aligned}$$

Le profit des entreprises de R&D augmentant la productivité du travail est le suivant :

$$\Pi_t^l = \eta_L (1 + \gamma_L) \frac{1 - \lambda}{\lambda} c \left(\frac{\lambda^2 P_t^{yL}}{c} \right)^{\frac{1}{1-\lambda}} L_t A_{t-1}^l$$

Les profits de la R&D dans les deux secteurs énergétiques s'obtiennent de manière analogue.

En prenant les profits de l'énergie verte comme référence, les profits relatifs entre les deux secteurs énergétiques sont :

$$\frac{\Pi_t^{ef}}{\Pi_t^{ev}} = \frac{1 + \tau_{f,t}^r (1 + \gamma_{Ef}) \eta_{Ef} \left(\frac{P_t^{yE^f}}{P_t^{yE^v}} \right)^{\frac{1}{1-\lambda}}}{1 + \tau_{v,t}^r (1 + \gamma_{Ev}) \eta_{Ev}} \frac{A_{t-1}^{ef} E_{ft}}{A_{t-1}^{ev} E_{vt}}$$

Les profits relatifs entre le secteur du travail et le secteur de l'énergie verte sont les suivants :

$$\frac{\Pi_t^l}{\Pi_t^{ev}} = \frac{1}{1 + \tau_{v,t}^r (1 + \gamma_{Ev}) \eta_{Ev}} \frac{(1 + \gamma_L) \eta_L \left(\frac{P_t^{yL}}{P_t^{yE^v}} \right)^{\frac{1}{1-\lambda}}}{A_{t-1}^{ev} E_{vt}} \frac{A_{t-1}^l L_t}{A_{t-1}^{ev} E_{vt}}$$

L'évolution du progrès technique est guidée par un mécanisme d'incitation économique : les chercheurs allouent leur capital humain dans le secteur qui affiche la rentabilité relative la plus élevée. Ainsi, un ratio de profit supérieur à 1 en faveur d'un secteur y attire la recherche. À l'équilibre, la direction de ce progrès technique est gouvernée par trois effets :

- un effet productivité qui conduit à innover dans le secteur à la productivité la plus haute. À mesure que l'on alloue plus de dépenses à l'un des secteurs de R&D qu'aux deux autres, ce secteur devient plus productif, et il devient ainsi d'autant plus rentable d'y investir. Cet

¹⁷⁹ Acemoglu D., Aghion P., Bursztyn L. et Hemous D. (2012), "The environment and directed technical change", *American Economic Review*.

effet est capté par les variables A_{t-1}^{ev} , A_{t-1}^{ef} et A_{t-1}^l qui mesurent la productivité relative des secteurs dans les deux équations de ratios de profits ci-dessus ;

- un effet prix qui encourage l'innovation dans le secteur aux prix les plus élevés. Ainsi, lorsque l'on introduit une taxe carbone qui augmente le prix de l'énergie brune, les dépenses de R&D en efficacité énergétique brune sont favorisées. Cet effet est présent au travers de P_t^{ef} , P_t^{ev} et P_t^l ;
- un effet taille de marché incitant à innover dans le secteur dont le marché des intrants spécialisés est le plus grand. Cet effet transparait au travers des termes L_t , E_{ft} et E_{vt} dans les deux équations *supra*.

Les profits relatifs entre les deux secteurs énergétiques peuvent être réécrits (en utilisant (****)) :

$$\frac{\Pi_t^{ef}}{\Pi_t^{ev}} = \frac{1 + \tau_{f,t}^r (1 + \gamma_{E_f}) \eta_{E_f}}{1 + \tau_{v,t}^r (1 + \gamma_{E_v}) \eta_{E_v}} \left(\frac{(1-b)}{b} \right)^\theta \left(\frac{(P_t^{ef} + \tau_{f,t})/A_t^{ef}}{(P_t^{ev} + \tau_{v,t})/A_t^{ev}} \right)^{(1-\lambda)(1-\theta)} \frac{1 + g_t^{aev}}{1 + g_t^{aef}}$$

et les profits relatifs entre le secteur du travail et le secteur de l'énergie verte (avec (*****)) :

$$\begin{aligned} \frac{\Pi_t^l}{\Pi_t^{ev}} = & \frac{1}{1 + \tau_{v,t}^r} \frac{(1 + \gamma_L) \eta_L}{(1 + \gamma_{E_v}) \eta_{E_v}} \frac{\alpha^\rho}{((1-\alpha)(1-\beta)b)^\theta} \frac{(P_t^l/A_t^l)^{(1-\lambda)(1-\rho)}}{((P_t^{ev} + \tau_{v,t})/A_t^{ev})^{(1-\lambda)(1-\theta)}} \frac{1 + g_t^{aev}}{1 + g_t^{al}} \\ & * \left(\frac{b^\theta \left((P_t^{ev} + \tau_{v,t})/A_t^{ev} \right)^{(1-\lambda)(1-\theta)} + (1-b)^\theta \left((P_t^{ef} + \tau_{v,t})/A_t^{ef} \right)^{(1-\lambda)(1-\theta)}}{((1-\alpha)(1-\beta))^{1-\theta}} \right)^{\frac{\rho-\theta}{1-\theta}} \end{aligned}$$

Il est supposé, hypothèse usuelle dans ce type de modèle, qu'à l'état stationnaire $\frac{\Pi_t^l}{\Pi_t^{ev}} = 1$ et $\frac{\Pi_t^{ef}}{\Pi_t^{ev}} = 1$.

Pour conclure cette section, il est fait la même hypothèse que dans l'article de Henriët *et al.* (2014) sur le fait que les profits réalisés par les secteurs de la recherche sont redistribués aux ménages.

2.2.3 Gouvernement

Les recettes fiscales perçues par le Gouvernement sont redistribuées de manière forfaitaire aux ménages, de sorte que son budget est équilibré à chaque date. Il peut aussi dans certains scénarios redistribuer une part des recettes qu'il collecte sous forme de subvention à la R&D énergétique verte ou fossile. Enfin, une part des recettes (S_t) sert à financer la R&D dans son ensemble. Les transferts totaux sont les suivants :

$$T_t = \tau_t^c (N_t + X_t) + \tau_{hf,t} E_{hf,t} + \tau_{hv,t} E_{hv,t} + \tau_{f,t} E_{f,t} + \tau_{v,t} E_{v,t} + \lambda [P_t^l L_t + (P_t^{ef} + \tau_{f,t}) E_{f,t} + (P_t^{ev} + \tau_{v,t}) E_{v,t}] - S_t$$

Pour le bouclage macroéconomique, l'équilibre sur le marché du bien générique et le marché du travail est :

$$Y_t = N_t + X_t + I_t + AC_{h,t} + AC_{f,t} + EX_t$$

Il est supposé que l'offre de travail est exogène :

$$L_t = \bar{L}$$

2.2.2 Commerce extérieur

L'économie nationale est modélisée sous la forme d'une « petite économie ouverte » (environnement international supposé exogène).

Les exportations du bien générique, notées EX_t , sont proportionnelles à une demande étrangère exogène $\overline{D}_t$, et dépendent des prix relatifs :

$$EX_t = \overline{D}_t \left(\frac{er_t \overline{P}_t}{P_t^y} \right)^{-\xi}$$

où $\overline{P}_t$ est le prix exogène du bien générique dans le reste du monde, er_t le taux de change et ξ l'élasticité prix des exportations.

Dans *Henriet et al.* (2014), les énergies brunes sont entièrement importées. Cette modélisation est conservée et le prix des producteurs en devise $\overline{P}_t^{ef}$ est exogène et croît à taux constant afin de refléter la rareté croissante des ressources non renouvelables, en cohérence avec une approche à la Hotelling (1931)¹⁸⁰.

$$\overline{P}_t^{ef} = (1 + \Pi_t^{ef}) \overline{P}_{t-1}^{ef}$$

Le prix des énergies brunes en devise domestique est :

$$P_t^{ef} = er \overline{P}_t^{ef}$$

La balance commerciale est toujours à l'équilibre grâce à l'ajustement du taux de change, er_t .

$$P_t^y EX_t = P_t^e (E_{hf,t} + E_{ff,t})$$

La modélisation de l'évolution du prix de l'énergie verte est similaire à celle de l'évolution des prix de l'énergie brune issue de *Henriet et al.* (2014), à ceci près qu'il est supposé que l'électricité est produite dans la zone euro. En conséquence, le taux de change n'est pas appliqué à son prix. L'évolution exogène du prix de l'énergie verte est ainsi donnée par :

$$P_t^{ev} = (1 + \Pi_t^{ev}) P_{t-1}^{ev}$$

Le prix de production au numéraire est normalisé, c'est-à-dire que $P_t^y = 1$, pour tout t . Ainsi, $P_t^n = P_t^l = P_t^x = 1$

De façon analogue à *Henriet et al.* (2014), les variables intensives (utilisées pour les simulations numériques du modèle) sont notées $x_t = X_t / (A_t^l L_t)$ et $p_t^l = P_t^l / A_t^l$ et l'offre de travail est normalisée $\bar{L}=1$. Les équations du modèle en variables intensives sont présentées dans l'Annexe 1.

¹⁸⁰ Hotelling H. (1931), "The Economics of Exhaustible Resources", *Journal of Political Economy*, Vol. 39, No. 2.

2.3 Calibrage et estimation des paramètres

Dans la plupart des cas, les valeurs estimées et utilisées dans Henriet *et al.* (2014) sont conservées, en revanche, la part du PIB allouée à la recherche, la part des dépenses de R&D allouée au progrès technique énergétique brun, le taux de croissance de la productivité du travail, le ratio du capital productif sur la production et les prix et taxes sur l'énergie brune sont mis à jour avec des données plus récentes et représentatives de l'économie française. Par ailleurs, tous les nouveaux paramètres du modèle, à savoir les élasticités de substitution entre types d'énergie, le taux de croissance du progrès technique énergétique vert ainsi que les prix et taxes relatifs à l'énergie verte sont estimés avec la littérature (*cf.* Annexe 2 pour un aperçu du calibrage du modèle).

2.4 Résultats¹⁸¹

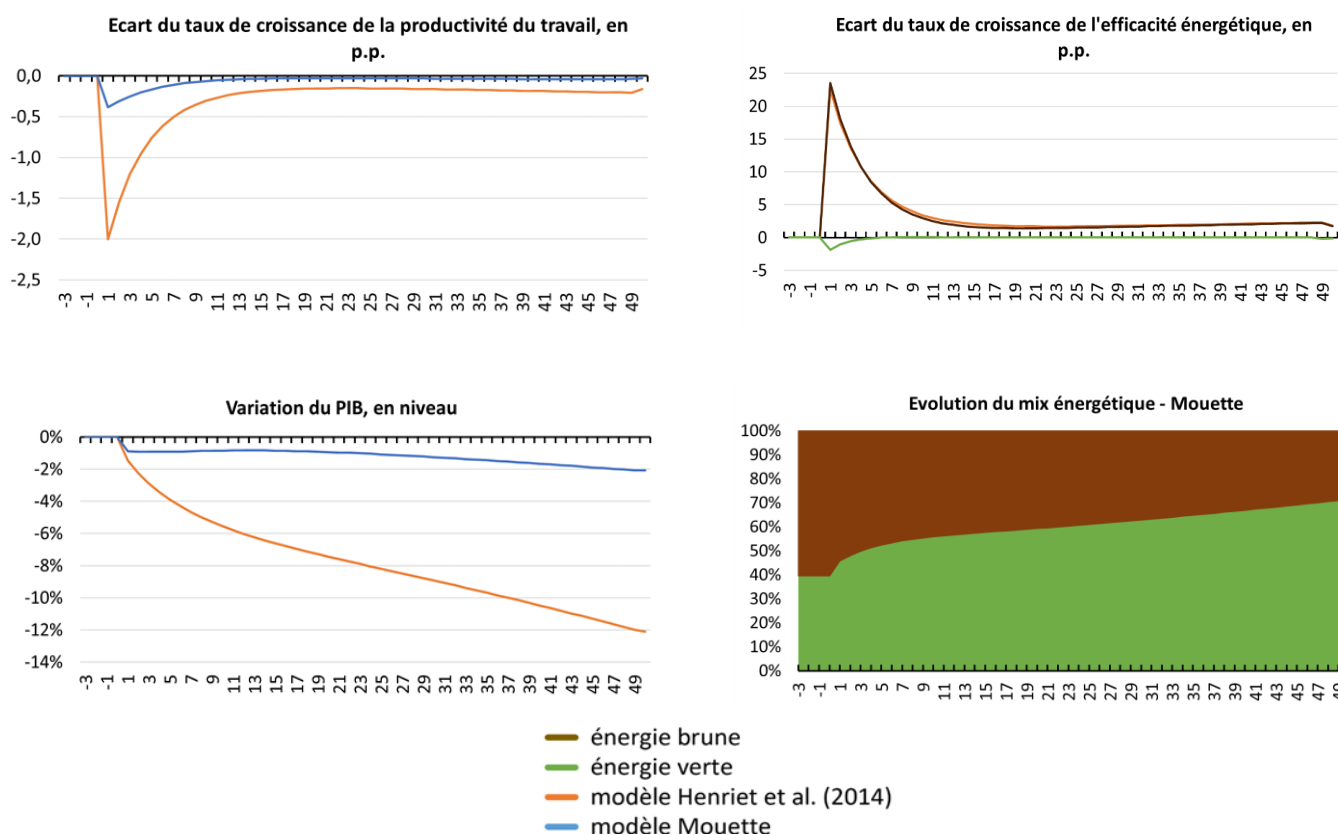
2.4.1 Comparaison avec le modèle de Henriet, Maggjar et Schubert (2014)

Afin de comparer la réaction du modèle Mouette à celui issu de l'article de Henriet *et al.* (2014), une même augmentation de la taxe carbone de 26 % la première année, puis de 6 % par an pendant 50 ans et une subvention à la R&D énergétique fossile de 20 % sont introduites dans ces deux modèles. Une telle fiscalité permet une réduction des émissions carbone de 75 % en 40 ans dans le modèle, soit l'objectif retenu pour le chiffrage du ralentissement de la productivité lors de la mission Pisani-Ferry - Mahfouz. Dans les deux modèles, lorsque la taxe carbone augmente, il devient plus profitable d'investir dans la R&D qui améliore l'efficacité énergétique brune, au détriment de la R&D qui améliore la productivité du travail. Cependant, dans Mouette, les ménages et les entreprises substituent en partie de l'énergie verte à l'énergie brune¹⁸² et sont donc moins affectés par ces mesures. En conséquence, les dépenses en R&D améliorant la productivité du travail et le taux de croissance de cette productivité diminuent moins. Les pertes de productivité du travail moyennes sont ainsi de moins de -0,1 p.p. par an les 40 premières années dans Mouette contre -0,3 p.p. dans Henriet *et al.* (2014). La part du vert dans l'énergie consommée par les ménages et les entreprises passe de 40 % à 60 % en 20 ans et 70 % en 50 ans. Après 50 ans, la taxe carbone arrête de croître, et les taux de croissance du progrès technique dans les différents domaines retournent progressivement vers leur niveau initial (voir Graphique 3).

¹⁸¹ Le modèle est simulé avec le logiciel Dynare, Adjemian S., Bastani H., Karam F., Juillard M., Maih J., Mihoubi F., Perendia G., Ratto M. et Villemot S. (2011), "Dynare: Reference manual, version 4", *Dynare Working Papers*, n° 1, CEPREMAP. Les résultats des simulations sont comparés à un scénario « *business as usual* » (et non à un scénario tenant compte des mesures existantes pouvant continuer à monter en charge, comme le scénario « AME » de la SNBC 3), *i.e.* il est supposé dans le scénario de référence que la fiscalité reste inchangée jusqu'en 2050 et que la part de l'énergie décarbonée dans la consommation totale d'énergie n'évolue pas.

¹⁸² Il est fait l'hypothèse d'une élasticité de substitution de 0,5, reflétant la faible substituabilité entre énergies à court terme. Les écarts entre les résultats simulés dans les deux modèles proviennent principalement de la mise à jour du calibrage du modèle et de l'introduction dans le modèle de l'énergie verte et d'un progrès technique afférent.

Graphique 3 : Résultats des simulations avec le modèle Mouette d'une augmentation de la taxe carbone et de l'introduction d'une subvention associées à une réduction de la consommation d'énergie brute de 75 % en 40 ans (par rapport à un référentiel sans transition, ni changement climatique)



Note : Le raisonnement est ici fait en années (axe des abscisses) suivant le premier changement fiscal afin de rendre comparables les simulations d'Henriet *et al.* (2014) datant de 2014 et celles de Mouette, datant de 2025. Les pics la 1^{ère} année sont un artéfact lié à l'ampleur du choc initial (+26 % de taxe carbone et +20 % de subventions à la R&D énergétique fossile), nécessaire à la réduction de 75 % de la consommation d'énergie brute en 40 ans. Par la suite, seule la taxe carbone continue à augmenter au rythme de 6 %/an, les subventions restant à 20 %, et les écarts des taux de croissance des progrès techniques simulés par rapport au scénario de référence se réduisent. Ainsi, seuls les écarts moyens des différents progrès techniques pendant la phase de transition et le niveau du PIB en fin de période doivent être interprétés¹⁸³.

2.4.2 Taxe carbone et subvention à la R&D associées à une réduction de l'utilisation d'énergie brute de 85 % en 2050.

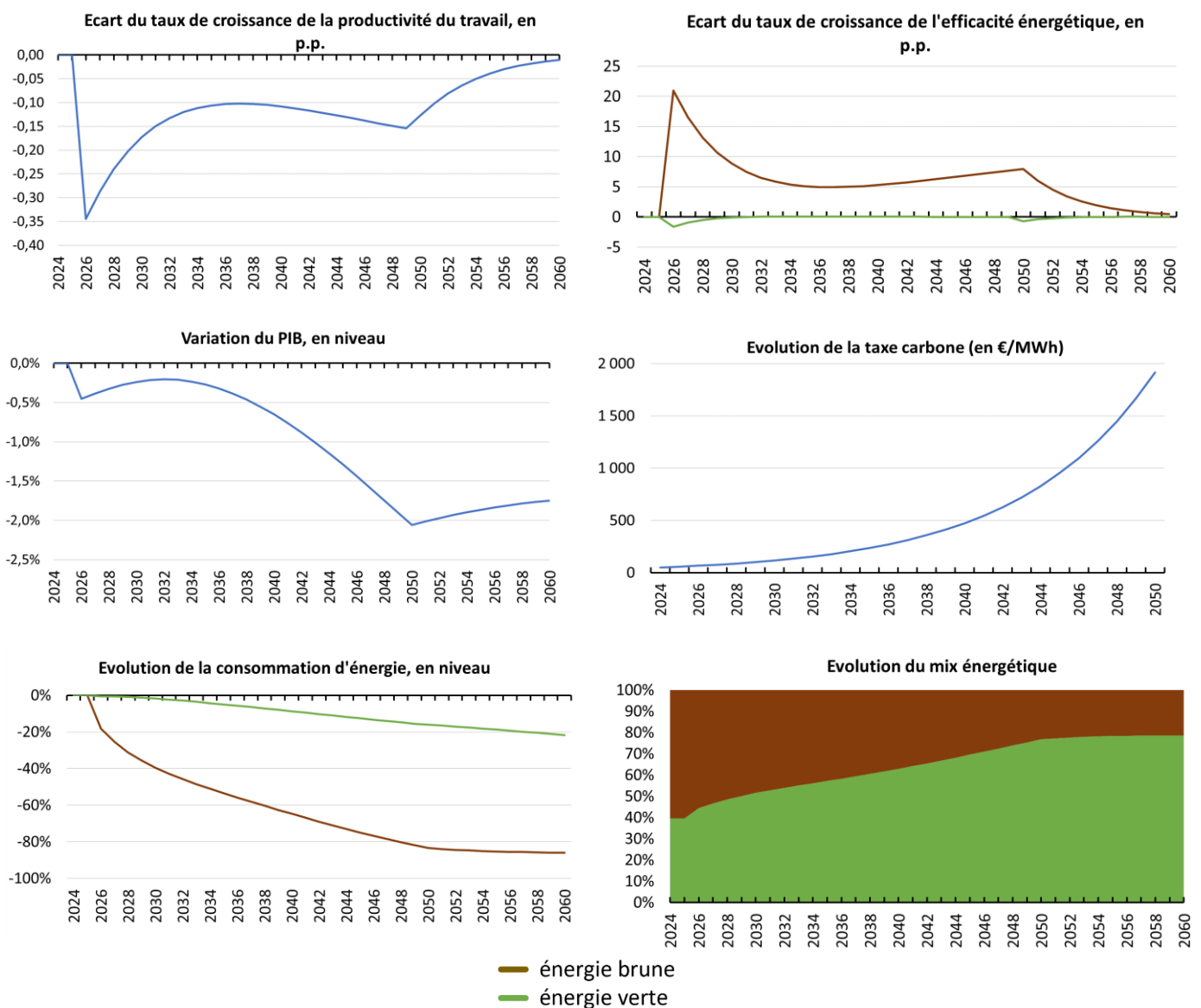
Dans la perspective d'atteinte de la neutralité carbone en 2050, un deuxième exercice de simulation avec un objectif de réduction de la consommation d'énergie brute en 2050 plus ambitieux est réalisé. Les contraintes techniques du modèle ne permettent toutefois pas une sortie complète des énergies fossiles à cet horizon¹⁸⁴ : en introduisant dans Mouette une augmentation annuelle de 15 % de la taxe carbone jusqu'en 2050 ainsi qu'une subvention de 20 % à la R&D brute, une réduction de la consommation d'énergie brute de 85 % en 2050 est atteinte.

¹⁸³ Les écarts des taux de croissance de la productivité du travail et de l'efficacité énergétique sont calculés en différence au scénario de référence, tandis que la variation du PIB est calculée en pourcentage en écart à sa valeur de référence, i.e. : $\frac{Y_t - Y^0}{Y^0}$, avec Y le PIB simulé et Y⁰ le PIB de référence.

¹⁸⁴ Le modèle rencontre des problèmes de convergence et la cible maximale de réduction de la consommation d'énergie fossile est de 85 %. Cf. partie 6 sur les pistes d'amélioration du modèle.

Le choc simulé ici est plus fort que dans l'exercice précédent, mais les mécanismes à l'œuvre sont similaires. La croissance de la taxe carbone et la subvention augmentent la profitabilité relative des dépenses de R&D liées à l'énergie brune, au détriment des dépenses de R&D dans les autres secteurs. La croissance de la productivité du travail est davantage ralentie que dans la simulation précédente, les pertes de productivité du travail moyennes atteignant $-0,15$ p.p. par an jusqu'en 2050. Le niveau de l'activité diminue ainsi de -2 points de PIB au même horizon. Enfin, le mix énergétique se transforme à mesure que la taxe carbone augmente. La part du vert dans l'énergie consommée par les ménages et les entreprises passe de 40% à 77% en 25 ans. De façon analogue à la simulation précédente, après 2050, la taxe carbone arrête de croître, et les taux de croissance du progrès technique dans les différents domaines retournent progressivement vers leur niveau initial (voir Graphique 4).

Graphique 4 : Résultats des simulations avec le modèle Mouette d'une augmentation de la taxe carbone et de l'introduction d'une subvention, associées à une réduction de la consommation d'énergie brune de 85 % en 2050 (par rapport à un référentiel sans transition, ni changement climatique)



Note : Les pics en 2026 sont un artéfact lié à l'ampleur du choc initial (+15 % de taxe carbone et +20 % de subventions à la R&D énergétique fossile), nécessaire à la réduction de 85 % de la consommation d'énergie brune en 2050. Par la suite, seule la taxe carbone continue à augmenter au rythme de 15 %/an, les subventions restant à 20 %, et les écarts des taux de croissance des progrès techniques simulés par rapport au scénario de référence se réduisent. Ainsi, seuls les écarts moyens des différents progrès techniques pendant la phase de transition et le niveau du PIB en 2050 doivent être interprétés.

2.5 Tests de robustesse

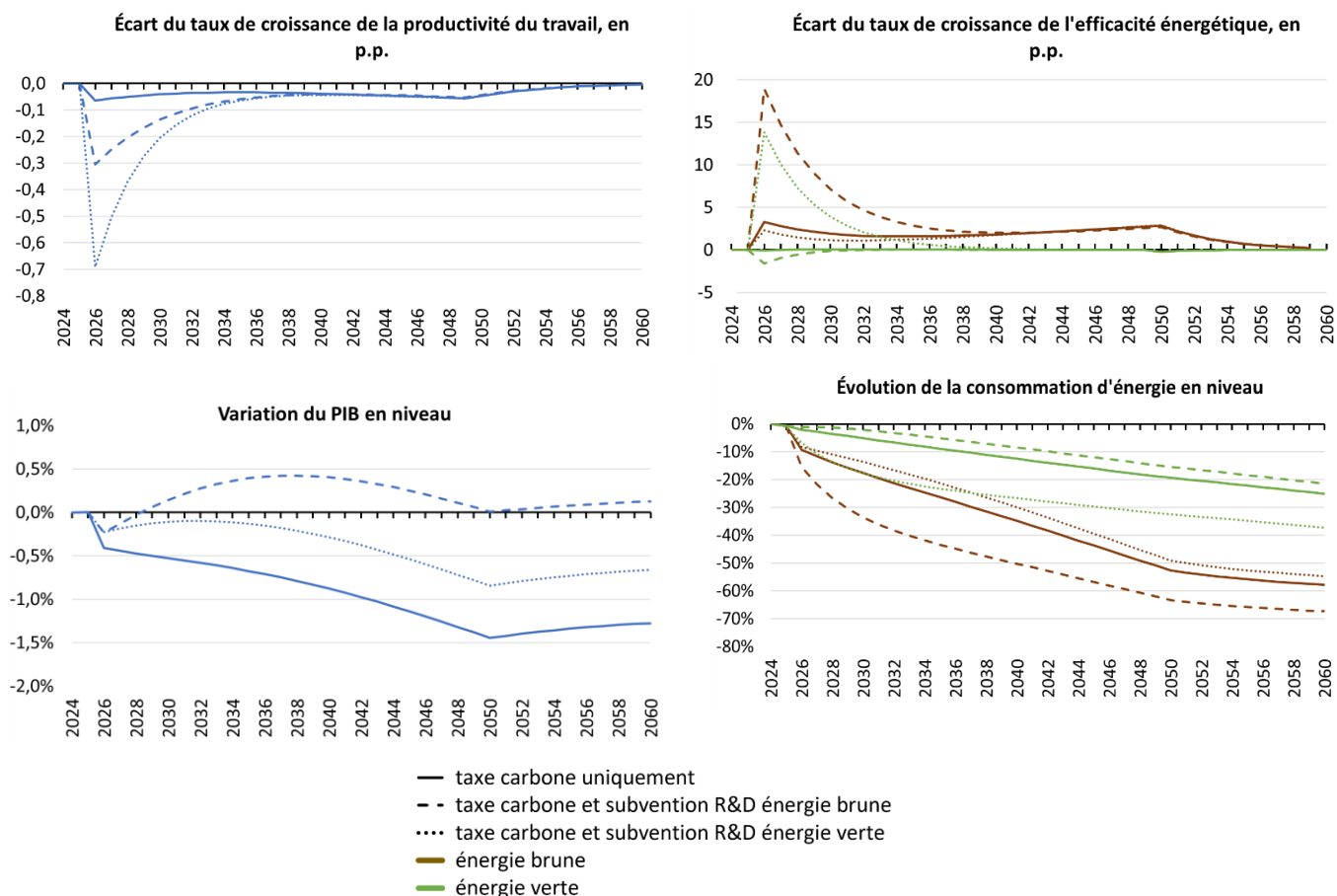
2.5.1. Instruments de fiscalité utilisés (taxe, subvention à la R&D en efficacité énergétique verte et subvention à la R&D en efficacité énergétique fossile)

Le développement du progrès technique brun dans Mouette permet des gains d'efficacité énergétique et *in fine* la réduction de l'énergie brune consommée. Dans le scénario central, la taxe carbone est combinée à une subvention à la R&D en efficacité énergétique brune car une taxe seule ne permet pas d'atteindre les objectifs de décarbonation de la SNBC 3. En effet, le taux de croissance annuel maximal sur 25 ans de la taxe carbone que l'on puisse atteindre dans Mouette, sans subventionner la R&D fossile, est de 14 %¹⁸⁵. Afin d'illustrer les effets des différents instruments de fiscalité, c'est-à-dire taxe carbone ou subvention à la R&D énergétique, trois scénarios sont simulés : l'un avec une augmentation de la taxe carbone de 10 %, un deuxième avec cette même évolution de la taxe carbone et une subvention de 20 % à la R&D énergétique fossile, et un troisième avec une taxe carbone similaire mais une subvention de 20 % à la R&D énergétique verte. Ces trois scénarios sont comparés dans les Graphiques 5 ci-dessous.

Le scénario avec taxe carbone uniquement introduit un choc plus lisse dans le modèle, conduisant à une hausse initiale moins élevée des dépenses en R&D énergétique fossile et à une moindre baisse initiale de la croissance de la productivité du travail. Le scénario avec hausse de la taxe carbone et subvention à la R&D énergétique verte conduit quant à lui à une hausse des dépenses de R&D dans les deux types d'énergie, et par conséquent à un ralentissement plus prononcé de la R&D en productivité du travail. Au total, le ralentissement moyen de la productivité du travail sur 25 ans est de -0,04 p.p. dans le scénario avec taxe uniquement, contre -0,08 p.p. dans le scénario combinant taxe et subvention à la R&D énergétique fossile et de -0,13 p.p. combinant taxe et subvention à la R&D énergétique verte. Malgré leur impact négatif sur la croissance de la productivité du travail, les subventions à la R&D énergétique, puisqu'elles permettent des gains d'efficacité énergétique et une réduction des quantités d'énergies consommées pour un même niveau de production, limitent la baisse de l'activité induites par la hausse du prix de l'énergie brune (via la hausse de la taxe carbone). La consommation d'énergie brune en 2050 est réduite de -53 % dans le cas d'une taxe uniquement, de -63 % dans le scénario qui combine taxe et subvention à la R&D énergétique fossile, et de -49 % dans le scénario de taxe et subvention à la R&D énergétique verte.

¹⁸⁵ Lorsque l'on introduit dans le modèle un choc de taxe carbone supérieur à cette augmentation de 14 % par an sans subventionner la R&D fossile, le modèle ne converge pas.

Graphique 5 : Résultats des simulations avec le modèle Mouette
d'une augmentation de la taxe carbone de 10 %/an et de la combinaison d'une même
augmentation et d'une subvention de 20 % à la R&D énergétique brune ou à la R&D énergétique
fossile (par rapport à un référentiel sans transition, ni changement climatique)



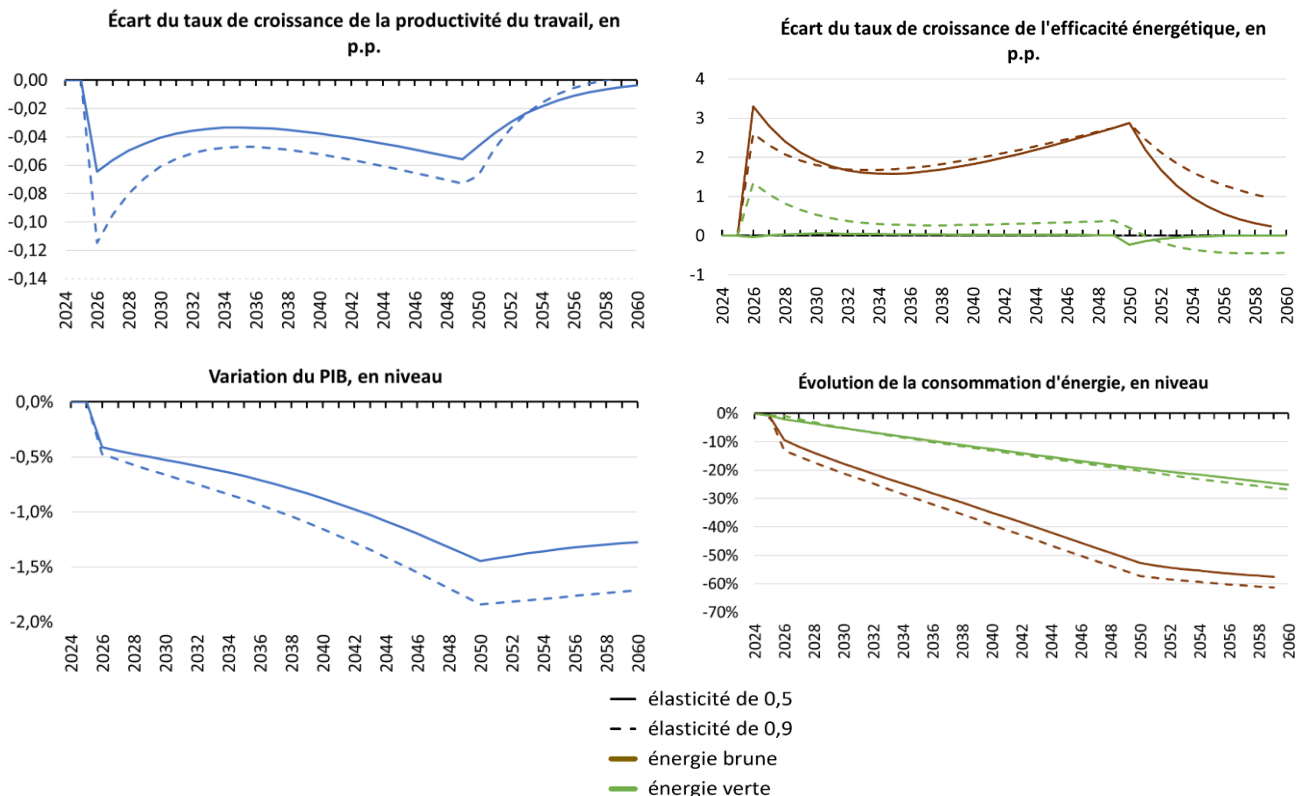
Note : Trois scénarios ont été simulés. Dans le premier, représenté par une ligne pleine dans les graphiques, une hausse de la taxe carbone de 10 % par an pendant 25 ans est introduite dans Mouette. Dans le deuxième, en plus de ce choc sur la taxe carbone, une subvention de 20 % au profit de la R&D énergétique brune est ajoutée au modèle. Ce scénario est représenté par une ligne avec tirets. Enfin, dans le troisième scénario, la hausse de la taxe carbone de 10 % par an est accompagnée par une subvention de 20 % au profit de la R&D énergétique verte. Ce scénario est représenté par une ligne avec points ronds. Après 2050, la taxe carbone arrête de croître et les subventions à la R&D énergétique prennent fin.

2.5.2. Élasticité de substitution entre énergies

Dans Mouette, l'élasticité de substitution entre énergies verte et brune est relativement faible (0,5) pour refléter les rigidités à court terme de l'ajustement du mix énergétique (voir Annexe 2 sur le calibrage du modèle). Les Graphiques 6 ci-dessous comparent les résultats de Mouette à ceux d'une variante avec une élasticité de substitution de 0,9 sur l'évolution des taux de croissance de la productivité du travail et des progrès techniques énergétiques pour le scénario avec taxe carbone uniquement (augmentant de 10 %/an). Lorsque l'élasticité de substitution entre énergies est plus élevée (0,9), l'augmentation de la taxe carbone conduit dès le court terme (2026) à une augmentation de la part d'énergie verte dans le mix et donc à des dépenses de R&D en progrès technique énergétique vert puisqu'elles deviennent plus rentables (en plus de la R&D en progrès technique brun). En conséquence, la croissance de la productivité du travail est davantage pénalisée les premières années. Par la suite, à mesure que les progrès réalisés dans les deux secteurs de R&D en efficacité énergétique diminuent la consommation d'énergie, il devient moins rentable d'y investir et la croissance des dépenses dans ces deux secteurs ralentit – et en miroir, les dépenses de R&D en productivité du travail réaugmentent. Pour l'élasticité de 0,5, ce sont uniquement les dépenses en R&D fossile qui ralentissent (celles en R&D verte n'augmentant pas à court terme). Dans les deux cas, même lorsqu'un point d'équilibre entre rentabilité des différents secteurs de R&D est atteint, les

taux de croissance de la R&D fossile augmentent à nouveau car la taxe carbone continue à augmenter, et ce, au détriment de la R&D en productivité du travail. Le plus fort ralentissement de la productivité du travail lorsque l'élasticité de substitution est plus élevée se traduit alors par une baisse plus importante de l'activité (–1,8 point en 2050 pour une élasticité de 0,9, contre –1,5 point pour une élasticité de 0,5). Après 2050, lorsque la taxe carbone arrête de croître, les taux de croissance des dépenses de R&D retournent progressivement vers leur niveau de référence. Les quantités d'énergies fossiles et vertes consommées évoluent de manière très similaire dans les deux scénarios.

**Graphique 6 : Résultats des simulations avec le modèle Mouette
d'une augmentation de la taxe carbone de 10 %/an selon l'élasticité de substitution
entre énergies retenue (par rapport à un référentiel sans transition, ni changement climatique)**

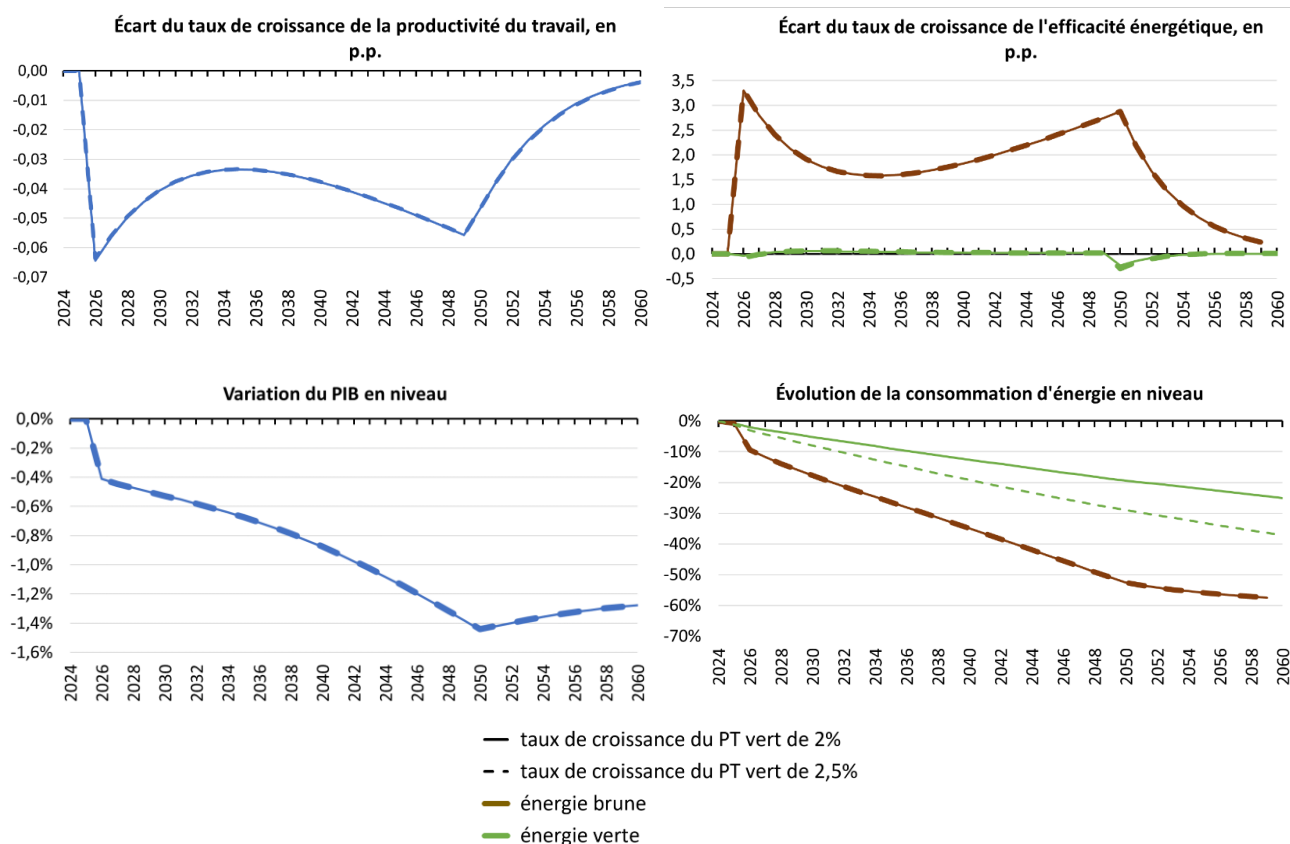


Note : Deux calibrages du modèle sont ici comparés. Dans le premier, représenté par une ligne pleine dans les graphiques, l'élasticité de substitution entre les énergies verte et brune est de 0,5. Dans le deuxième, cette élasticité est de 0,9. Ce calibrage est représenté par une ligne avec tirets. Dans les deux cas, une hausse de la taxe carbone de 10 % par an pendant 25 ans, jusqu'en 2050, est introduite dans le modèle.

2.5.3. Taux de croissance des progrès techniques énergétiques à l'état stationnaire

Dans Mouette, les taux de croissance des progrès techniques énergétiques vert et fossile à l'état stationnaire sont supposés égaux, à 2 %/an, conformément au taux retenu pour le progrès technique énergétique dans l'article de Henri et *al.* (2014). L'effet de cette hypothèse est illustré dans les Graphiques 7 ci-dessous qui représentent deux scénarios de hausse de la taxe carbone de 10 %/an jusqu'en 2050 : dans le premier, le taux de croissance annuel du progrès technique vert à l'état stationnaire est égal à 2 %, comme dans Mouette, tandis que dans le second il est de 2,5 %, et donc plus élevé que le taux de croissance annuel du progrès technique brun. Ce choix de calibrage n'a d'effet ni sur l'évolution des progrès techniques en écart au scénario de référence, ni sur la variation de l'activité. En revanche, la consommation d'énergie verte diminue plus rapidement lorsque le taux de croissance du progrès technique énergétique vert est plus élevé.

Graphique 7 : Résultats des simulations avec le modèle Mouette d'une augmentation de la taxe carbone de 10 %/an selon le taux de croissance du progrès technique vert à l'état stationnaire retenu (par rapport à un référentiel sans transition, ni changement climatique)

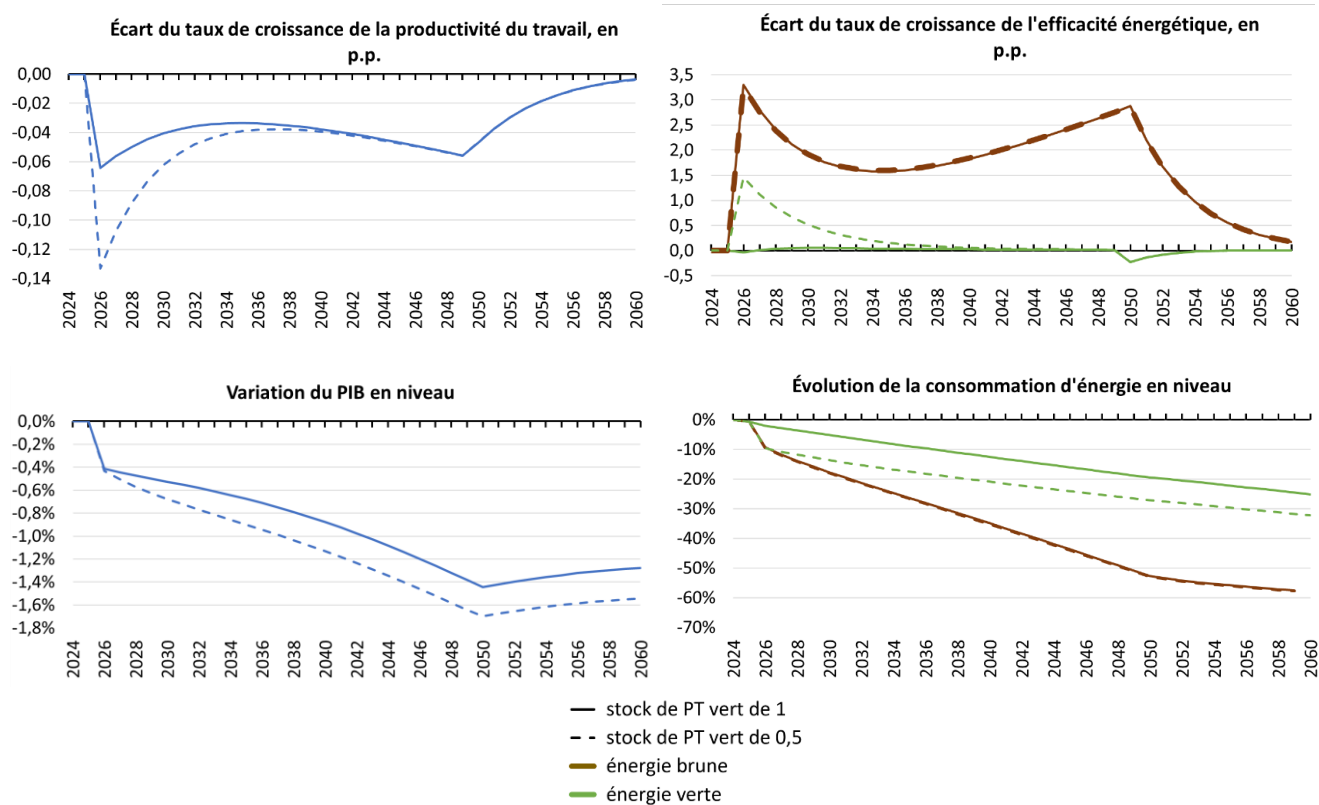


Note : Deux calibrages du modèle sont ici comparés. Dans le premier, représenté par une ligne pleine dans les graphiques, le taux de croissance du progrès technique (PT) énergétique vert est de 2 % (comme dans le calibrage principal de Mouette). Dans le deuxième, il est de 2,5 %. Ce calibrage est représenté par une ligne avec tirets. Dans les deux cas, une hausse de la taxe carbone de 10 % par an pendant 25 ans, jusqu'en 2050, est introduite dans le modèle.

2.5.4. Stock initial de progrès technique vert

Dans Mouette, les stocks de progrès techniques énergétiques vert et brun ont été initialisés égaux et normalisés à 1, par simplicité : il est donc supposé que les deux secteurs de R&D énergétiques, vert et brun, disposent initialement du même niveau de maturité et de connaissances accumulées au début de la période d'étude. Pour illustrer l'incidence de ce choix, l'effet d'une augmentation de la taxe carbone de 10 %/an dans le cas où le stock initial de progrès technique vert est calibré à 1, comme dans Mouette, et dans le cas où il est initié à 0,5 (*i.e.* sous l'hypothèse d'un retard technologique initial de la R&D énergétique verte) est étudié. Le choix d'un stock initial de 1 conduit à une baisse moins importante des dépenses en R&D améliorant la productivité du travail, ce qui se traduit aussi par un moindre coût en matière de perte de productivité du travail (*cf.* Graphiques 8). Lorsque le stock initial de progrès technique vert est plus faible, il devient rentable d'investir en R&D énergétique verte. En effet, lorsque la taxe carbone augmente, les ménages et entreprises remplacent une partie de l'énergie brune qu'ils consomment par de l'énergie verte, et il devient profitable d'innover pour que l'énergie verte comble en partie son retard vis-à-vis de l'énergie brune en matière d'efficacité énergétique. Les dépenses en R&D énergétique brune évoluent de la même manière pour les deux calibrages retenus, et la productivité du travail est donc davantage pénalisée lorsque le stock de progrès technique vert est plus faible au départ.

Graphique 8 : Résultats des simulations avec le modèle Mouette d'une augmentation de la taxe carbone de 10 %/an selon le stock initial de progrès technique vert retenu (par rapport à un référentiel sans transition, ni changement climatique)



Note : Deux calibrages du modèle sont ici comparés. Dans le premier, représenté par une ligne pleine dans les graphiques, le stock initial de progrès technique (PT) énergétique vert est égal au stock initial de PT énergétique brun et vaut 1 (comme dans le calibrage principal de Mouette). Dans le deuxième, il est de 0,5. Ce calibrage est représenté par une ligne avec tirets. Dans les deux cas, une hausse de la taxe carbone de 10 % par an pendant 25 ans, jusqu'en 2050, est introduite dans le modèle.

3. Méthodologie de quantification de la perte de croissance potentielle induite par les investissements en décarbonation à partir d'une fonction de production

3.1 Motivation

Le développement du modèle Mouette vise à quantifier la perte de productivité potentielle liée à la réallocation de la R&D pendant la phase de transition. Un second canal, identifié dans la revue de littérature, a également fait l'objet d'un chiffrage : la hausse des coûts de production liés à la transition bas-carbone. D'abord, les investissements de décarbonation visent à mettre en place des technologies pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, mais ont, au moins à court terme, une productivité marginale inférieure à celle de leurs équivalents carbonés, du fait notamment d'un historique de R&D moindre. Ces investissements peuvent par ailleurs impliquer une réorganisation de l'appareil productif. Les entreprises ne pourraient alors pas augmenter significativement leur capacité de production, et verraient leurs coûts de production augmenter et leur productivité diminuer, de manière transitoire¹⁸⁶. Il y a également un risque d'effet d'éviction de ces investissements sur d'autres investissements productifs, qui dépendra *in fine* de la capacité des systèmes bancaire et financier à allouer les financements vers les entreprises les plus productives et les plus décarbonées, sans évincer les entreprises productives qui ne sont pas directement concernées par la transition. À long terme, la transition bas-carbone pourrait générer de nouveaux gains de productivité, par le biais des marges intensives (amélioration des processus de production) et extensives (sélection des entreprises les plus performantes), ainsi que par l'innovation verte, qui pourrait permettre un retour sur le sentier de croissance prévalant avant la transition. Cette section explore le canal du surcoût des investissements en décarbonation et les implications sur la croissance de la productivité.

Plusieurs concepts de productivité sont mobilisés dans ce travail. Le PIB potentiel est défini comme le volume de production de biens et de services que peut atteindre durablement une économie en utilisant pleinement ses capacités de production, mais sans créer de tensions inflationnistes. À long terme, la croissance du PIB potentiel dépend de la croissance de la population, du stock de capital, de la productivité globale des facteurs (PGF) et des efficacités du capital et du travail. La productivité globale des facteurs est définie comme la part du PIB potentiel qui n'est pas expliquée par la combinaison des facteurs de production efficaces travail et capital. La productivité (ou efficacité) factorielle mesure l'efficacité de chaque facteur de production (travail ou capital). En général, et en particulier pour cette étude, il est supposé que l'efficacité du capital est égale à un et que la PGF est un scalaire, pouvant également être normalisée à un, de sorte que seule l'efficacité du travail est explicitement modélisée (comme par exemple dans le modèle Mésange¹⁸⁷). Dans ce cas, l'efficacité du travail capture entièrement l'évolution de la production qui n'est pas expliquée par les variations dans l'usage des facteurs. Ainsi, dans la suite de cette section, les termes de productivité et d'efficacité sont utilisés de manière interchangeable.

La méthodologie proposée dans cette section s'inscrit dans le cadre des évaluations macroéconomiques de la transition bas-carbone pouvant être réalisés avec des modèles macroéconométriques. Ces exercices, complémentaires d'autres méthodologies¹⁸⁸, compensent l'incapacité de ces modèles à simuler une hausse endogène de l'investissement en décarbonation face à un rehaussement du prix fictif du carbone, en juxtaposant un choc de prix du carbone (avec éventuellement une redistribution des recettes fiscales dans le cas où ce choc transiterait par de la fiscalité) et un choc

¹⁸⁶ Pisani-Ferry et Mahfouz (2023), *op. cit.*

¹⁸⁷ Bardaji J., Campagne B., Khder M.-B., Lafféter Q. et Simon O. (Insee), Dufernez A.-S., Elezaar C., Leblanc P., Masson E. et Partouche H. (2017), « [Le modèle macroéconométrique Mésange : ré-estimation et nouveautés](#) », Direction générale du Trésor, *Documents de travail*, n° 2017/04.

¹⁸⁸ Gantois et al. (2022), *op.cit.*

d'investissements supplémentaires (verts, nets des désinvestissements bruns, et financés). Le Réseau des Banques Centrales pour le verdissement de la finance (NGFS)¹⁸⁹ et la DG Trésor¹⁹⁰ ont, entre autres, réalisés de tels exercices. Les chocs d'investissement mobilisés présentent toutes les caractéristiques d'un choc d'investissement classique (effet multiplicateur, effet accélérateur), dont les coefficients ont souvent été estimés sur des données passées, sans distinction entre investissement vert et investissement brun. L'utilisation d'un choc de productivité permet de prendre en compte dans ces évaluations plusieurs dimensions jusque-là ignorées.

3.2 Méthodologie

Cette sous-partie propose d'évaluer l'impact potentiellement négatif à court/moyen terme des investissements en décarbonation sur la productivité, du fait de leur surcoût pour les entreprises sans qu'ils n'augmentent significativement la production, et sans inclure les potentiels dommages du changement climatique. Pour ce faire, l'analyse s'appuie sur une fonction de production, laquelle, en proposant une représentation stylisée au niveau macroéconomique de l'appareil productif, permet de quantifier les pertes de productivité que les surcoûts des investissements en décarbonation pourraient induire.

La fonction de production retenue est une fonction de type CES imbriquée (voir Encadré 4 pour une généralisation). Au premier niveau, sur la base de la spécification de la fonction de production du modèle macroéconométrique Mésange, le travail, augmenté de la productivité globale des facteurs, est combiné avec un agrégat capital. Les deuxième et troisième niveaux de la fonction visent à décomposer le capital selon une spécification analogue au modèle d'équilibre général dynamique et stochastique E-QUEST mobilisé par la Commission européenne pour l'évaluation *ex ante* de l'impact macroéconomique du paquet « fit-for-55 »¹⁹¹. Ainsi, au deuxième niveau, le capital est décomposé entre le capital concerné par la transition bas-carbone et le reste du capital productif. Au dernier niveau, le capital concerné par la transition bas-carbone est décomposé entre un capital émissif (lié aux énergies brunes), un capital décarboné, et un capital ne rentrant pas dans ces deux catégories mais néanmoins affecté par les politiques de décarbonation.

Formellement, la fonction de production est définie par :

$$Y = \left[\alpha K^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} + (1 - \alpha)(AL)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} \right]^{\frac{\sigma}{\sigma-1}}$$

Où Y, K, L, A désignent respectivement la valeur ajoutée, le capital agrégé, le travail et l'efficacité du travail ; α la part du capital dans la valeur ajoutée ; σ l'élasticité de substitution constante entre le capital et le travail.

$$K = \left[\beta_P K_P^{\frac{\rho-1}{\rho}} + \beta_{TE} K_{TE}^{\frac{\rho-1}{\rho}} \right]^{\frac{\rho}{\rho-1}}$$

Où K_P et K_{TE} désignent respectivement le capital productif et le capital concerné par la transition bas-carbone ; β_P et β_{TE} un paramètre de préférence pour les capitaux productif et lié à la transition bas-carbone ; ρ l'élasticité de substitution constante entre les deux types de capitaux.

$$K_{TE} = \left[\gamma_V K_V^{\frac{\vartheta-1}{\vartheta}} + \gamma_B K_B^{\frac{\vartheta-1}{\vartheta}} + \gamma_G K_G^{\frac{\vartheta-1}{\vartheta}} \right]^{\frac{\vartheta}{\vartheta-1}}$$

¹⁸⁹ NGFS (2025), *op.cit.*

¹⁹⁰ DG Trésor (2025), *op.cit.*

¹⁹¹ Cambridge Econometrics (2021), "Exploring the trade-offs in different paths to reduce transport and heating emissions in Europe".

Où K_V, K_B et K_G désignent respectivement les capitaux décarboné, émissif et les autres capitaux touchés par la transition bas-carbone ; γ_V, γ_B et γ_G respectivement la préférence pour le capital décarboné, le capital émissif et les autres capitaux concernés par la transition bas-carbone ; ϑ l'élasticité de substitution constante entre ces trois formes de capital.

En complément, les quatre formes de capital, émissif, décarboné, autre touché par la transition bas-carbone et productif, sont construites selon des équations d'accumulation usuelles :

$$K_V = (1 - \delta)K_{V,-1} + I_V$$

$$K_B = (1 - \delta)K_{B,-1} + I_B$$

$$K_G = (1 - \delta)K_{G,-1} + I_G$$

$$K_P = (1 - \delta)K_{P,-1} + I_P$$

Où I_V, I_B, I_G et I_P désignent les investissements dans les quatre formes de capital et δ le taux de dépréciation, supposé identique pour les quatre capitaux, en l'absence d'information suffisante pour pouvoir les différencier.

Un choc d'efficacité du travail négatif est calculé de sorte à avoir une hausse du stock de capital agrégé cohérente avec les surplus d'investissements en décarbonation, nets des désinvestissements émissifs et de la variation des autres investissements concernés par la transition bas-carbone, pour un niveau de production, de travail et d'investissement productif inchangé. Ainsi, une première fonction de production est construite à partir des hypothèses du scénario « avec mesures existantes » (AME) de 2024 mobilisé par la troisième version de la stratégie nationale bas-carbone (SNBC 3, voir *infra* pour une description des données) :

$$Y_{AME} = \left[\alpha K_{AME}^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} + (1 - \alpha)(A_{AME}L_{AME})^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} \right]^{\frac{\sigma}{\sigma-1}}$$

Une deuxième fonction de production est ensuite construite à partir des besoins d'investissements en décarbonation du scénario « avec mesures supplémentaires » (AMS) de la SNBC 3 (avec l'hypothèse $L_{AME} = L_{AMS}$) :

$$Y_{AMS} = \left[\alpha K_{AMS}^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} + (1 - \alpha)(A_{AMS}L_{AME})^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} \right]^{\frac{\sigma}{\sigma-1}}$$

Il est fait l'hypothèse que le niveau de production est identique entre les deux scénarios, c'est-à-dire $Y_{AME} = Y_{AMS}$. En effet, les investissements en décarbonation poursuivent un objectif distinct des investissements productifs classiques, en permettant non pas une production plus importante, mais une production décarbonée. Ces investissements peuvent par ailleurs avoir une productivité marginale inférieure à celle de leurs équivalents carbonés et impliquer des coûts de réorganisation de l'appareil productif. Ainsi, à niveau de production (et de travail) inchangé, l'augmentation du stock de capital induite par les investissements en décarbonation s'accompagne d'un ajustement de l'efficacité du travail.

En notant ε_{AMS} la perte relative d'efficacité du travail telle que $A_{AMS} = (1 - \varepsilon_{AMS})A_{AME}$, on peut en déduire une relation entre $\varepsilon_{AMS}, K_{AME}, K_{AMS}, A_{AME}, L_{AME}$

$$\varepsilon_{AMS} = 1 - \left[1 - \frac{\alpha}{1 - \alpha} \left(\frac{1}{A_{AME}L_{AME}} \right)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} \left[K_{AMS}^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} - K_{AME}^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} \right] \right]^{\frac{\sigma}{\sigma-1}}$$

Ainsi, la perte d'efficacité est une fonction croissante du surplus de capital lié à la transition bas-carbone, toutes choses égales par ailleurs. En pratique, la baisse de l'efficacité se calcule à chaque période, et il

n'y a donc pas de lien direct entre $\varepsilon_{AMS,t-1}$ et $\varepsilon_{AMS,t}$. La cohérence intertemporelle de la chronique de choc est cependant assurée par les séries sous-jacentes d'investissements.

Cette baisse est une borne haute, en valeur absolue, car seules les pertes de productivité induites par les surcoûts des investissements en décarbonation sont ici modélisées. Les entreprises pourraient par ailleurs chercher à réaliser des gains d'efficacité dans l'organisation de leur appareil productif de sorte à minimiser l'impact négatif de ce surcoût. De plus, certains investissements, par exemple le déploiement d'énergies renouvelables, ou la modernisation de l'appareil productif, ont vocation à améliorer le potentiel productif de la France.

Enfin, la question des actifs échoués liés à la décarbonation n'est pas évaluée ici : dans le cadre d'une transition ordonnée, le risque de dépréciation accélérée d'une partie du stock de capital est marginal, ce dernier se renouvelant avec la substitution des investissements en décarbonation avec les investissements émissifs¹⁹².

Encadré 4 : Généralisation à toute fonction de production

Une fonction de production $Y_t = f(A_t; K_t; L_t)$ continue et dérivable est considérée, où K_t et L_t désignent respectivement le stock de capital et le travail, pouvant chacun agréger des sous-composantes substituables, et A_t la productivité globale des facteurs (PGF). Il est fait l'hypothèse qu'à l'équilibre (noté s), $\forall t \geq 0, Y_{t,s} = f(A_{t,s}; K_{t,s}; L_{t,s})$.

L'économie est confrontée à une hausse du stock de capital ΔK_t , sans incidence sur la production. Il s'agit alors de déterminer la baisse de productivité ϵ_t correspondant à cette hausse, calibrée de sorte à maintenir la production constante. En supprimant l'indicateur temporel, et en maintenant dans un premier temps la quantité de travail constante,

$$f(A_s; K_s; L_s) = f((1 - \epsilon)A_s; K_s + \Delta K_s; L_s)$$

Une approximation au premier ordre, autour de l'équilibre s , donne, en écrivant f_F les dérivées partielles de f par rapport aux différents termes $F \in \{A, K, L\}$

$$f(A_s; K_s; L_s) \simeq f(A_s; K_s; L_s) - \epsilon A_s f_A(A_s, K_s, L_s) + \Delta K_s f_K(A_s, K_s, L_s)$$

$$\epsilon \simeq \frac{\Delta K_s f_K(A_s, K_s, L_s)}{A_s f_A(A_s, K_s, L_s)}$$

Cette baisse de PGF correspond donc au ratio d'un gain marginal de la hausse de capital, et d'une baisse marginale de la productivité. Il est possible de réécrire, en multipliant au numérateur et au dénominateur par le capital et la production, et en considérant les élasticités de la production à la productivité A et au capital K , $\eta_A = \frac{\partial Y}{\partial A} \frac{A}{Y}$ et $\eta_K \simeq \frac{\partial Y}{\partial K} \frac{K}{Y}$

$$\epsilon \simeq \left(\frac{\Delta K_s}{K_s} \right) \left(\frac{\eta_K}{\eta_A} \right).$$

Ainsi, la perte de productivité augmente avec la hausse relative du capital $\frac{\Delta K_s}{K_s}$, et avec le ratio des élasticités η_K et η_A . Plus η_K est grand (c'est-à-dire plus l'économie est intensive en capital), plus la baisse de la PGF doit être importante pour compenser une même hausse du capital. L'élasticité η_A est quant à elle plus neutre : quand, dans une fonction de production standard (Cobb-Douglas ou CES par exemple), A est uniquement un scalaire, cette élasticité vaut 1.

¹⁹² Voir Girard *et al.* (2023), *op. cit.*

Le relâchement de l'hypothèse d'une offre de travail constant modifie l'équation d'origine et la forme de ϵ

$$f(A_s; K_s; L_s) = f((1 - \epsilon)A_s; K_s + \Delta K_s; L_s + \Delta L_s)$$

$$\epsilon \simeq \frac{\Delta K_s f_K(A_s, K_s, L_s)}{A_s f_A(A_s, K_s, L_s)} + \frac{\Delta L_s f_L(A_s, K_s, L_s)}{A_s f_A(A_s, K_s, L_s)}$$

$$\epsilon \simeq \left(\frac{\Delta K_s}{K_s}\right) \left(\frac{\eta_K}{\eta_A}\right) + \left(\frac{\Delta L_s}{L_s}\right) \left(\frac{\eta_L}{\eta_A}\right).$$

Travail et capital étant plutôt complémentaires en France¹⁹³, en réalisant une approximation de second ordre de cette équation, on devrait obtenir $\Delta L_s > 0$: la hausse de l'investissement s'accompagne d'une hausse du travail. Ainsi, la perte de productivité correspondant à une hausse de l'investissement serait plus importante avec une hausse du travail qu'avec une offre de travail constante, car il faudrait également, sous ces hypothèses, compenser l'augmentation du travail par une baisse de la productivité.

3.3 Données et calibrage

Le calibrage du choc négatif de productivité induit par le surcoût des investissements en décarbonation s'appuie sur plusieurs sources de données, récapitulées dans le tableau 1 ci-dessous. En premier lieu, 6 sources ont été mobilisées pour initialiser la fonction de production, à l'année 2022, en cohérence avec les hypothèses de modélisation de la SNBC 3 :

- La valeur ajoutée, le stock de capital hors capital résidentiel, considéré comme non-productif (*cf. infra*), et le nombre de travailleurs proviennent des comptes nationaux de l'Insee.
- Le taux de dépréciation cohérent avec la définition du stock de capital retenu est calculé à partir des comptes nationaux de l'Insee et du Bulletin Officiel des Finances Publiques (BoFiP).
- L'élasticité de substitution entre le capital et le travail provient du modèle Mésange.
- L'élasticité de substitution entre le capital concerné par la transition bas-carbone et le capital productif est fournie par Henri et al. (2014), à partir d'une estimation économétrique sur données françaises.
- L'élasticité de substitution entre les trois formes de capital concernées par la transition bas-carbone, provient de Papageorgiou et al. (2017)¹⁹⁴, en cohérence avec le calibrage retenu par l'Insee pour son modèle stylisé visant à étudier le risque de capital échoué.
- La part du capital dans la valeur ajoutée est donnée par Bauer et Boussard (2020)¹⁹⁵, calculée sur la base de données d'entreprises et cohérente avec les hypothèses usuelles de partage capital/travail.

La Direction générale du Trésor a agrégé diverses sources de chroniques de besoin d'investissements en décarbonation¹⁹⁶. Fondés sur les travaux de l'Ademe, d'I4CE, de Rexecode et de la DGEC, ces travaux sont cohérents avec les scénarios AME, modélisant l'ensemble des mesures de décarbonation mises en place en France jusqu'en 2021, et AMS, proposant une trajectoire cohérente avec l'atteinte des objectifs

¹⁹³ Cette G., Koehl K. et Philippon T. (2019), « Le partage de la valeur ajoutée dans quelques pays avancés », Banque de France, *Documents de Travail*, n° 727. La médiane de l'élasticité de substitution entre capital et travail se situe entre 0,4 et 0,8. Dans le cas du modèle macroéconométrique Mésange, elle est de 0,44.

¹⁹⁴ Papageorgiou C., Saam M. et Schulte P. (2017), "Substitution between clean and dirty energy inputs: A macroeconomic perspective", *Review of Economics and Statistics*, 99(2):281–290.

¹⁹⁵ Bauer A. et Boussard J. (2020), « Pouvoir de marché et part du travail », Insee, *Économie et statistique*, n° 520-521.

¹⁹⁶ Ces sources sont cohérentes avec les chiffrages de la stratégie pluriannuelle des financements de la transition écologique et de la politique énergétique nationale (SPAFTE). Elles présentent également l'avantage de proposer des données jusqu'en 2050. Leur sélection s'appuie sur Gourmand L. (2024), « [Quels besoins d'investissements pour les objectifs français de décarbonation en 2030 ?](#) », Direction générale du Trésor, *Trésor-Éco*, n° 342.

de réduction des émissions, de la troisième version de la stratégie nationale bas-carbone (SNBC), en cours de finalisation :

- I4CE fournit des chroniques sur les investissements en décarbonation, les investissements émissifs et les autres investissements touchés par la transition bas-carbone, pour les secteurs des bâtiments tertiaires, des transports (hors véhicules particuliers) et de la production énergétique.
- L'Ademe donne des chroniques pour les investissements en décarbonation dans l'industrie uniquement.
- Enfin, Rexecode (2022)¹⁹⁷ permet d'avoir des données sur les besoins d'investissements en décarbonation dans l'agriculture. Toutefois, ces besoins ont été calculés à partir de la version précédente de la SNBC. Ils sont donc ajustés au prorata de la trajectoire actualisée de réduction des émissions dans ce secteur, telle que calculée par la DGEC.

Les investissements réalisés par les ménages¹⁹⁸ sont exclus de l'analyse dans la mesure où ils ne touchent pas directement le potentiel de l'économie : le surcoût de ces investissements pour les ménages se traduirait davantage par un effet de richesse négatif. Ainsi, l'étude porte sur les investissements réalisés par les entreprises et les administrations.

Les différentes formes de capital sont initialisées à partir des besoins d'investissements respectifs (cf. *infra*), en inversant l'équation d'accumulation du capital définie à l'état stationnaire :

$$K_j = \frac{I_j}{\delta + g} \text{ avec } j \in \{V ; B ; G\}$$

Où g désigne le taux de croissance potentielle¹⁹⁹. Ainsi, le capital concerné par la transition bas-carbone représente un peu plus de 30 % du stock de capital hors résidentiel. De plus, les capitaux décarbonés, émissifs et autres touchés par la transition représentent respectivement 23 %, 71 % et 6 % du capital concerné par la transition. Il est à noter que la part du capital émissif est sous-estimée dans la mesure où il n'y a pas de données sur les investissements émissifs dans l'agriculture et l'industrie, et que les données I4CE supposent des investissements nuls dans la production énergétique à partir d'énergies fossiles. Enfin, il est fait l'hypothèse que les investissements productifs non touchés par la transition bas-carbone, et donc le stock de capital sous-jacent, évoluent au même rythme que la valeur ajoutée.

Sur la base de ces données, les facteurs de préférence entre les différents types de capital sont calibrés à partir des conditions du premier ordre. De manière générale, on a :

$$K_i = \gamma_i^\vartheta \left(\frac{r_i}{r_{TE}} \right)^{-\vartheta} K_{TE} \text{ avec } i \in \{V ; B ; G\}$$

$$K_i = \beta_i^\rho \left(\frac{r_i}{r} \right)^{-\rho} K \text{ avec } i \in \{P ; TE\}$$

Il est fait l'hypothèse que le coût du capital r_i est identique pour toutes les formes de capital, du fait de données insuffisantes pour les différencier. Cette hypothèse permet également de traduire l'absence de *greenium*, c'est-à-dire de prime de risque différencié en fonction de la nature du capital (émissif ou décarboné). Ainsi, les facteurs de préférence sont calculés comme suit :

$$\gamma_i = \left(\frac{K_i}{K_{TE}} \right)^{\frac{1}{\vartheta}} \text{ avec } i \in \{V ; B ; G\}$$

¹⁹⁷ Rexecode (2022), « Les enjeux économiques de la décarbonation de la France – Une évaluation des investissements nécessaires ».

¹⁹⁸ Ces investissements correspondent à l'achat de véhicules et à la rénovation du parc résidentiel, soit respectivement de la consommation de biens durables et des investissements dans la comptabilité nationale.

¹⁹⁹ Les résultats de cette étude sont très peu sensibles à cette hypothèse de croissance de long terme, dès lors que l'on se place en pourcentage en écart au scénario de référence.

$$\beta_i = \left(\frac{K_i}{K} \right)^{\frac{1}{\rho}} \text{ avec } i \in \{P; TE\}$$

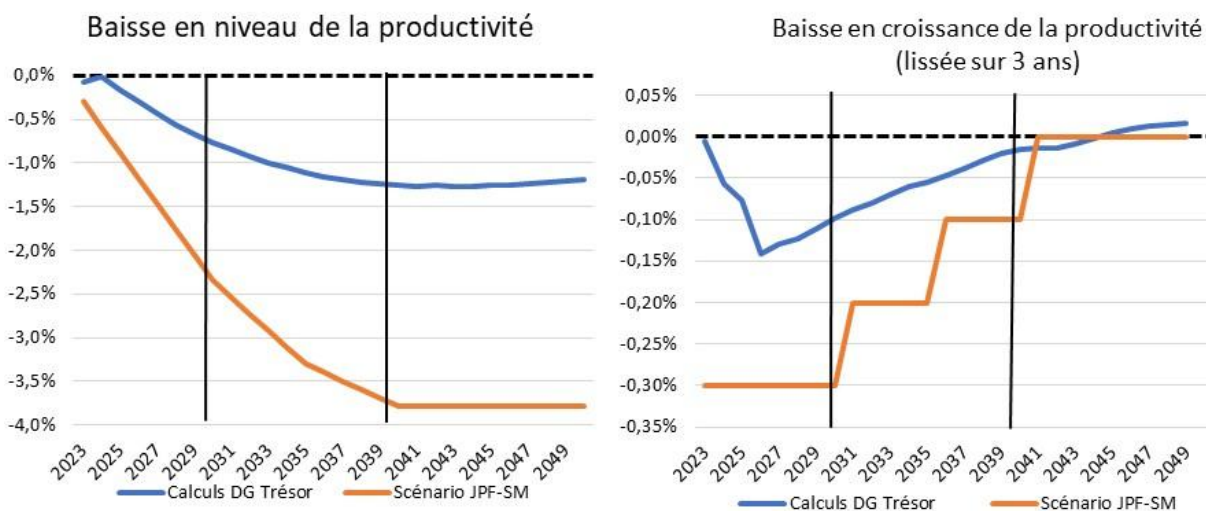
L'efficacité du travail est finalement calculée en inversant la fonction de production :

$$A = \left(\frac{Y^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} - \alpha K^{\frac{\sigma-1}{\sigma}}}{(1-\alpha)L^{\frac{\sigma-1}{\sigma}}} \right)^{\frac{\sigma}{\sigma-1}}$$

3.4 Résultats

La hausse des investissements liés à la transition bas-carbone induit une diminution du niveau de la productivité globale des facteurs pendant la phase de transition (voir graphiques 9 et 9bis ci-dessous), de l'ordre de -0,75 % en 2030, puis qui se stabilise autour de -1,2 % à partir de 2035. **La perte de croissance annuelle de la productivité du travail atteindrait un pic entre 2025 et 2030, de l'ordre de - 0,15 point de pourcentage, avant de refluer et de devenir négligeable à partir de 2040.** En moyenne, la croissance de la productivité est réduite de 0,04 p.p. par an jusqu'en 2050.

Graphique 9 : Baisse de la productivité du travail en niveau et en croissance pendant la phase de transition vers la neutralité carbone liée aux surcroûts d'investissement²⁰⁰



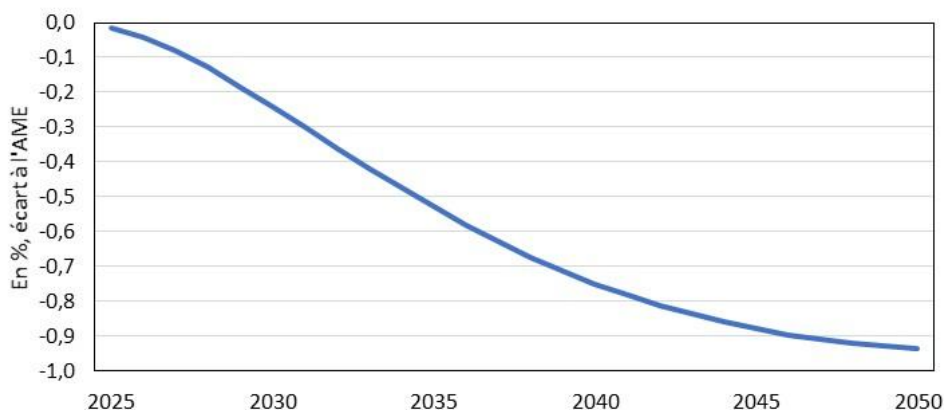
L'impact macroéconomique de cette perte de productivité peut ensuite être évalué avec le modèle macroéconométrique Mésange (voir le tableau dans l'Annexe 3). **Les résultats qui suivent sont stylisés et à prendre avec précaution, pour deux raisons.** D'une part, ils correspondent à la variante efficacité du travail, qui seule est disponible dans Mésange, et non à un choc sur la productivité globale des facteurs, qui serait plus pertinent pour évaluer les conséquences du surcoût des investissements productifs, mais qui n'est pas modélisé dans Mésange. De manière usuelle dans ce type de modèle, la baisse de l'efficacité du travail joue directement sur la demande de travail des entreprises conduisant à une hausse de l'emploi peu cohérente avec les effets *a priori* attendus. D'autre part, ces résultats ne tiennent pas compte des autres canaux de transmission de ce choc d'investissement, via la demande²⁰¹. Pour cette raison, seules les implications sur l'activité de ce choc sont présentées.

²⁰⁰ Le graphique 10bis est lissé sur trois ans afin de nettoyer les sauts brutaux des premières années et autour de 2030 et 2040, provenant des chroniques sous-jacentes.

²⁰¹ Voir le chapitre macroéconomique du rapport de la DG Trésor (2025) *op. cit.* qui intègre l'impact du rehaussement du prix du carbone, ses options d'utilisation des recettes fiscales, la hausse des investissements liés à la transition, leur financement, et la baisse de productivité liée à ces surcoûts étudiés ici.

La perte de productivité induite par le surcoût des investissements en décarbonation entraînerait une perte d'activité de l'ordre de 0,9 pt de PIB en 2050 (voir Graphique 10). En 2030, la baisse du niveau d'activité serait contenue autour de 0,3 pt de PIB (les effets de ce type de chocs étant longs à se matérialiser dans Mésange), mais la persistance du choc de productivité négatif induit dès 2040 une baisse de 0,8 pt de PIB.

Graphique 10 : Impact sur l'activité du surcoût des investissements en décarbonation, approximé par un choc de productivité du travail



Sources : Calculs des auteurs, modèle Mésange.

3.5 Tests de robustesse : paramètres et sources de données

Le choix de la fonction de production et de ses paramètres modifie sensiblement les résultats obtenus. Des tests de robustesse sont ainsi réalisés, en mobilisant des sources de données alternatives, pour :

- Le taux de dépréciation, calibré par défaut à 11 %, en considérant comme valeur alternative 5 % et 9 %, provenant respectivement du modèle stylisé de l'Insee pour analyser les risques de capital échoué²⁰² et de la base de données de la Commission européenne EU KLEMS.
- L'élasticité de substitution entre capital et travail, calibrée à 0,44 à partir de Mésange, avec pour valeur alternative 0,53, provenant du modèle macroéconométrique de la Banque de France, FR-BDF²⁰³, ces deux valeurs étant estimées économétriquement.
- L'élasticité de substitution entre capital productif et capital concerné par la transition bas-carbone, calibrée à 0,48 sur la base de l'estimation économétrique sur données françaises réalisée par Henriët *et al.* (2014), avec pour valeur alternative 0,23 à partir de l'estimation économétrique de Lalanne *et al.* (2009)²⁰⁴ également sur données françaises, et 1 issue du modèle d'équilibre général dynamique et stochastique E-QUEST²⁰⁵.

Toutes les combinaisons possibles d'hypothèses de calibrage alternatives sont testées. En 2030, la baisse du niveau de la productivité s'établit entre -0,45 % et -1,06 %, soit **une baisse de la croissance entre 0,06 p.p. et 0,15 p.p.** La baisse de productivité se stabilise entre -1,1 et -1,7 % en 2050, alors que la croissance de la productivité est revenue autour de son niveau d'origine (voir les graphiques 11 ci-dessous).

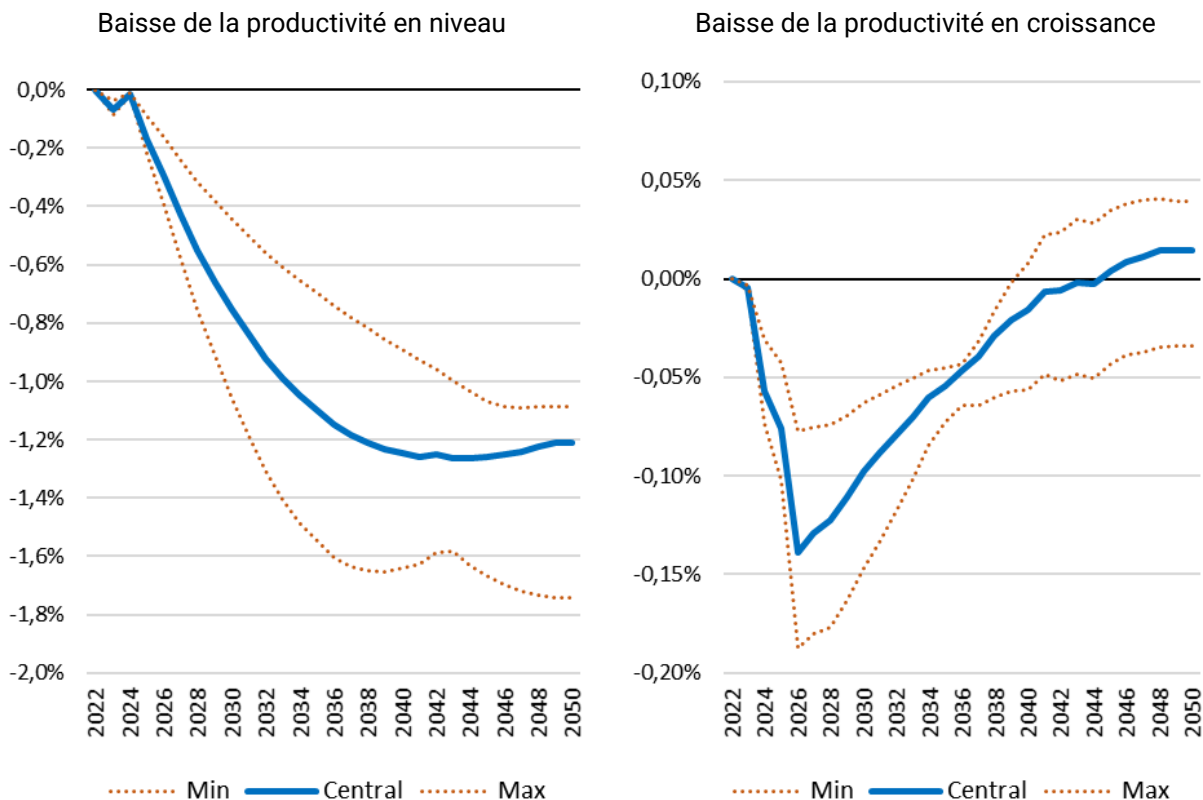
²⁰² Abbas *et al.* (2024), *op. cit.*

²⁰³ Lemoine M., Turunen H., Chahad M., Lepetit A., Zhutova A., Aldama P., Clerc P., Laffargue J.-P. (2021), « Le modèle FR-BDF et une évaluation des effets de la politique monétaire en France », Banque de France, *Documents de travail*, n° 736.

²⁰⁴ Lalanne G., Pionnier P.-A., Simon O. (2009), « Le partage des fruits de la croissance de 1950 à 2008 : une approche par les comptes de surplus », Insee, *Insee Références*, Édition 2009.

²⁰⁵ Ratto M., Roeger W. et Veld J. in 't (2009), "QUEST III: An Estimated Open-Economy DSGE Model of the Euro Area with Fiscal and Monetary Policy", *Economic Modelling*, 26 (2009).

Graphique 11 : Baisse de la productivité du travail en niveau et en croissance pendant la transition vers la neutralité carbone liée aux surcroûts d'investissement – tests de robustesse



Note de lecture : En 2030, la baisse de la productivité en niveau s'établit entre -0,4 % et -1,1 %, soit une baisse de la croissance de la productivité entre 0,06 p.p. et 0,15 p.p. La baisse de productivité en niveau se stabilise entre -1,7 et -1,1 % en 2050, alors que la croissance de la productivité est revenue autour de son niveau d'origine.

Toutes choses égales par ailleurs, une hausse du taux de dépréciation implique une dégradation moins marquée à moyen terme de la croissance de la productivité, du fait d'un renouvellement plus rapide du stock de capital. En effet, un taux de dépréciation plus élevé implique un amortissement plus rapide du nouveau capital, donc une croissance moins rapide du stock d'une période à une autre, limitant les pertes de productivité. Une hausse de l'élasticité de substitution entre capital et travail aggrave le choc à court et moyen terme, en amplifiant la sensibilité de la productivité globale des facteurs à l'évolution du stock de capital. La PGF portant sur le facteur travail dans la spécification retenue, une augmentation du stock de capital se répercute négativement sur la productivité, pour un niveau de production et d'emploi donné. Enfin, une hausse de l'élasticité de substitution entre capital productif et énergétique implique une aggravation de la perte de productivité à court terme, mais permet un redressement plus conséquent de la croissance à long terme, selon le même effet distorsif que pour la substitution entre le capital et le travail.

4. Discussion et perspectives

4.1 Mise en perspective des résultats

Si la transition bas-carbone permet de limiter l'impact négatif du changement climatique sur la croissance potentielle, elle pourrait aussi avoir un effet négatif sur la productivité globale des facteurs : celle-ci pourrait être réduite à court terme en raison d'une hausse des coûts de production des entreprises liée au renchérissement du prix du carbone mais aussi d'une réorientation de la R&D en faveur de l'efficacité énergétique et des énergies et procédés bas carbone. Ainsi, d'après les résultats obtenus dans les parties précédentes, la croissance de la productivité ralentirait de 0,15 p.p. par an jusqu'en 2050 en raison de

l'éviction de la R&D correspondante, et de 0,2 p.p. au total, en ajoutant l'effet de l'éviction des investissements hors R&D. À titre de comparaison, la mission Jean Pisani-Ferry et Selma Mahfouz faisait l'hypothèse d'une baisse de la croissance de la productivité²⁰⁶ de 0,3 p.p. jusqu'en 2050. Toutefois, comme souligné dans le rapport thématique sur la productivité de la mission²⁰⁷, ces résultats constituaient une borne haute des pertes de productivité pouvant être attendues.

Les deux exercices présentés dans ce document de travail ne sont toutefois ni exhaustifs, ni totalement additifs. Ils visent d'une part à préciser et chiffrer des dimensions de l'impact sur la croissance potentielle de la transition écologique identifiés comme principaux au cours de la mission Pisani-Ferry-Mahfouz et dans la revue de littérature en première section du document. D'autres chiffrages, notamment autour des enjeux de capitaux échoués, de frictions sur les marchés du travail, ou d'innovation verte sont ainsi présentés dans ce document mais ne participent pas à cette baisse de 0,2 p.p. D'autre part, les résultats du modèle Mouette et de la maquette de chiffrage des surcoûts peuvent se recouper partiellement, dans la mesure où les investissements en R&D du modèle Mouette sont aussi implicitement pris en compte dans les scénarios de la maquette. Enfin, ces résultats demeurent dépendants des scénarios de transition retenus (en termes d'options de politiques publiques retenues, de leur profil temporel, de leur intensité et du degré de coopération internationale), de certains choix de modélisation, et de l'horizon temporel sur lequel les résultats moyens ont été calculés.

4.2 Voies d'amélioration du modèle Mouette

Le développement du modèle Mouette permet d'obtenir des résultats crédibles quant à l'effet de modifications de la fiscalité énergétique sur la croissance de la productivité et l'évolution de l'efficacité énergétique. Cependant, pour réduire la consommation d'énergie brune, Mouette nécessite une forte hausse du signal-prix qui se répercute en un coût relativement élevé en matière de croissance de la productivité. Par ailleurs, le modèle ne permet pas actuellement d'atteindre complètement la neutralité carbone en 2050 sur la seule base de gains d'efficacité énergétiques. Ce coût peut être considéré comme une estimation haute des pertes de croissance de l'efficacité du travail liées à la réduction de l'utilisation d'énergie brune et quatre pistes sont envisagées pour améliorer les propriétés de Mouette : un bouclage international, l'introduction d'externalités entre secteurs de recherche, l'endogénéisation de la part du PIB dédiée à la R&D et l'introduction de changements de préférences en lien avec la question de la sobriété. Ces quatre pistes sont susceptibles d'atténuer davantage les pertes de croissance de la productivité liées à la transition énergétique, bien que certains axes soient plus complexes à mettre en place que d'autres.

4.2.1 Bouclage international

Il est actuellement fait l'hypothèse dans la modélisation que la France est la seule à intensifier ses efforts en recherche énergétique en vue de la transition. Cependant, il est probable que d'autres pays s'engagent dans la même voie, de sorte que la France bénéficie d'innovations apparues à l'étranger, diminuant ainsi le coût de la transition. Pour intégrer cette dimension dans la modélisation, il faudrait en théorie développer un modèle avec plusieurs zones géographiques ou ajouter à Mouette une innovation mondiale exogène, avec un effet d'externalité positif sur la France et dont l'élasticité serait à calibrer. Il s'agirait de répartir l'effort de recherche total estimé avec Mouette entre les principales zones sources d'innovation verte.

4.2.2 Externalités entre secteurs de R&D

Dans Mouette, conformément à la modélisation adoptée par Henriët *et al.* (2014), l'évolution du progrès technique d'un secteur de R&D est indépendante de celle des deux autres secteurs. Pourtant, des externalités positives entre secteurs sont observées. En utilisant les citations de brevets, Nemet (2012)²⁰⁸ étudie les flux de connaissance entre technologies pour les brevets énergétiques accordés entre 1976 et

²⁰⁶ Pisani-Ferry J. et Mahfouz S. (2023), *op. cit.*

²⁰⁷ Epaulard A., Pommeret A. et Schubert K. (2023), « Les incidences économiques de l'action pour le climat – Rapport thématique sur la productivité », France Stratégie.

²⁰⁸ Nemet G. F. (2012), "Inter-technology knowledge spillovers for energy technologies", *Energy Economics*, vol. 34, p. 1259-1270.

2006. La plupart des citations reçues par les brevets issus de la R&D énergétique sont le fait de brevets non énergétiques, ce qui suggère que la recherche énergétique a une application générale. Le processus par lequel le développement d'une technologie dans un secteur donné augmente la productivité de l'innovation dans les autres secteurs pourrait donc être introduit dans Mouette. Une telle modélisation apparaît dans le travail de Fried (2018)²⁰⁹ qui présente un modèle avec progrès technique dirigé calibré sur des données américaines. Dans ce modèle, la fonction de production du bien final utilise de l'énergie et d'autres biens intermédiaires avec des possibilités de substitution faibles. La production énergétique combine énergies brune et verte avec des possibilités de substitution entre les deux agrégats, comme dans Mouette. Tous les biens intermédiaires sont produits par des technologies mêlant du travail et des machines spécifiques qui incorporent du progrès technique dirigé. L'évolution de la productivité des machines spécifiques à chaque secteur dépend des efforts de R&D du secteur, ces derniers dépendant eux-mêmes de la rentabilité de la recherche. Contrairement aux hypothèses retenues par Henriet *et al.* (2014), le progrès technique d'un secteur bénéficie (en partie) aux deux autres secteurs (ce qui réduit le coût en croissance du progrès dirigé vers les secteurs de l'énergie). Fried (2018) introduit une taxe carbone dans ce modèle pour permettre de réduire les émissions de CO₂ (la consommation d'énergie brune) de 30 % à un horizon de 20 ans. Après 20 ans, la taxe induit un surcroît d'innovation de 50 % supérieur dans le secteur de l'énergie verte et une diminution de 60 % dans le secteur de l'énergie brune. L'auteure calcule le pourcentage de variation de la consommation de l'agent représentatif dans le scénario de référence nécessaire à ce qu'il soit indifférent à l'introduction d'une telle taxe carbone. Elle montre alors que cette taxe équivaut à une réduction de sa consommation de -0,3 %. L'amélioration du modèle Mouette en ce sens, sera *a priori* une piste à privilégier.

4.2.3 Endogénéisation de la part du PIB dédiée à la R&D

Dans Mouette, les dépenses de R&D sont calibrées à 2,22 % du PIB, soit une part exogène et constante, bien que l'allocation de cette part entre les trois secteurs de recherche soit endogène. Ce choix de modélisation se justifie en partie par la stabilité de cette part en France depuis 1995²¹⁰. Il est pourtant possible que les besoins de recherche liés à la transition bas-carbone conduisent à une augmentation de celle-ci. Il pourrait alors être envisagé de modifier Mouette en ce sens. Néanmoins, et contrairement à l'introduction d'externalités entre secteurs de R&D ou d'effet d'entraînement entre zones géographiques, l'endogénéisation de l'effort de recherche n'a pas *a priori* été modélisée dans la littérature et sera donc plus difficile à intégrer dans Mouette.

4.2.4 Sobriété

Dans Mouette, l'évolution des consommations d'énergie des ménages et des entreprises résulte de l'évolution du progrès technique énergétique et de l'efficacité du travail, donc de l'évolution des investissements dans les différents secteurs de R&D et *in fine* de l'évolution des prix relatifs de l'énergie et des biens de consommation. Celle-ci dépend surtout des taxes et subventions décidées par le gouvernement. Pourtant, la sobriété, c'est-à-dire la « démarche visant à réinterroger les besoins individuels et collectifs pour y répondre en adaptant nos modes de vie et de production afin de réduire les émissions de GES et la pression sur les ressources, tout en poursuivant des objectifs d'équité sociale et d'intérêt général »²¹¹, ne découle pas seulement de contraintes imposées par les politiques publiques. Elle peut aussi provenir d'un changement de préférences des individus ou d'une évolution des normes sociales. Le potentiel de réduction des émissions d'ici 2050 induit par la sobriété serait significatif et pourrait représenter 15 % de l'énergie finale pour la France par rapport à aujourd'hui²¹². Il pourrait alors être envisagé de réaliser avec Mouette des simulations avec changements de préférences en faveur de l'énergie verte, en s'inspirant par exemple des travaux de Oliu-Barton *et al.* (2024). Les auteurs modélisent dans leur article les changements de préférences des ménages comme une modification des poids relatifs accordés par les individus aux biens durables, à l'énergie ou encore aux biens non durables dans leurs préférences. Ils

²⁰⁹ Fried S. (2018), *op. cit.*

²¹⁰ Insee (2020), « Recherche & Développement – Tableaux de l'économie française ».

²¹¹ Ademe (2025), « Vers une économie de la sobriété ».

²¹² Pisani-Ferry J. et Mahfouz S. (2023), *op. cit.*

montrent que leurs effets macroéconomiques sont différents de ceux d'une augmentation de la taxe carbone et que l'évolution de la production pendant la phase de transition peut dépendre du rôle joué par les changements de préférence dans l'atteinte de la neutralité carbone.

4.3 Limites et pistes d'amélioration de la quantification des effets du surcoût des investissements en décarbonation

L'évaluation de la perte de productivité liée au surcoût des investissements en décarbonation s'appuie sur une analyse statique en équilibre partiel, mobilisant plusieurs sources de données hétérogènes. Elle ne tient notamment pas compte de la capacité des entreprises à générer des gains d'efficacité dans l'organisation de leur production, qui viendrait limiter les pertes de productivité. Cette méthode pourrait être étendue dans le cadre d'un modèle stylisé²¹³, qui permettrait de tenir compte des effets de bouclage macroéconomique.

La baisse de la productivité engendrée par le surcoût des investissements supplémentaires en décarbonation est avant tout une baisse de la productivité globale des facteurs. Mésange permettant exclusivement de réaliser des chocs d'efficacité du travail, le choc de baisse de productivité a été calibré avec une fonction de production cohérente avec ce modèle. En outre, l'analyse pourrait être affinée avec une ventilation sectorielle du choc, pouvant par ailleurs s'appuyer sur le modèle ThreeME.

²¹³ Voir par exemple Henriët *et al.* (2025), *op. cit.*

Annexe 1 : Équations du modèle Mouette en variables intensives

De façon analogue à *Henriet et al. (2014)*, les variables intensives sont notées $x_t = X_t/(A_t^l L_t)$ et $p_t^l = P_t^l/A_t^l$ et l'offre de travail est normalisée $\bar{L}=1$. De nouvelles variables stationnaires à long terme sont également introduites :

$$\begin{aligned}(A^{ev}e_{vh})_t &= A_t^{ev}e_{vh,t}, (A^{ef}e_{fh})_t = A_t^{ef}e_{fh,t}, (A^{ef}e_{ff})_t = A_t^{ef}e_{ff,t}, (A^{ev}e_{vf})_t = A_t^{ev}e_{vf,t}, (P^{ef}/A^{ef})_t = \\ P_t^{ef}/A_t^{ef}, (P^{ev}/A^{ev})_t &= P_t^{ev}/A_t^{ev}, (\tau_{hf}/A^{ef})_t = \tau_{hf,t}/A_t^{ef}, (\tau_{hv}/A^{ev})_t = \tau_{hv,t}/A_t^{ev}, (\tau_f/A^{ef})_t = \\ \tau_{f,l}/A_t^{ef}, (\tau_v/A^{ev})_t &= \tau_{v,l}/A_t^{ev}\end{aligned}$$

Les équations du modèle en variables intensives sont les suivantes :

Consommation totale des ménages :

$$c_t = \left(\gamma n_t^{\frac{\omega-1}{\omega}} + (1-\gamma) z_{h,t}^{\frac{\omega-1}{\omega}} \right)^{\frac{\omega}{\omega-1}}$$

Consommation de biens durables et d'énergie des ménages :

$$z_{h,t} = \left(v \left(\frac{d_{t-1}}{1+g_t^{al}} \right)^{\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}} + (1-v) Aee_{h,t}^{\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}} \right)^{\frac{\varepsilon}{\varepsilon-1}}$$

Consommation énergétique des ménages :

$$Aee_{h,t} = \left(f (A^{ef}e_{fh})_t^{\frac{\zeta-1}{\zeta}} + (1-f) (A^{ev}e_{vh})_t^{\frac{\zeta-1}{\zeta}} \right)^{\frac{\zeta}{\zeta-1}}$$

Arbitrage entre la consommation de biens non durables et la consommation totale : $\left(\frac{n_t}{n_{t+1}} \right)^{\frac{1}{\omega}} \left(\frac{c_t}{c_{t+1}} \right)^{\frac{\omega-1}{\omega}} =$

$$\frac{(1+g_{t+1}^{al})(1+\mu)}{1+r_{t+1}}$$

Prix du stock de biens durables :

$$P_t^d = (1+\tau^c)(r_t + \delta_d) + \kappa_d \left[(1+r_t) \left(\frac{d_{t-1}}{d_{t-2}} - 1 \right) - \frac{1}{2} (1+g_t^{al}) \left(\left(\frac{d_t}{d_{t-1}} \right)^2 - 1 \right) \right]$$

Arbitrage entre l'investissement en biens durables et la consommation d'énergie :

$$\frac{Aee_{h,t+1}^{\frac{(\varepsilon-1)-\frac{(\zeta-1)\varepsilon}{\zeta}}{\zeta}} d_t}{(1+g_{t+1}^{al})(A^{ef}e_{fh})_{t+1}^{\frac{\zeta}{\zeta-1}}} = \left(\frac{v}{(1-v)f} \frac{(P^{ef}/A^{ef})_{t+1} + (\tau_{hf}/A^{ef})_{t+1}}{P_{t+1}^d} \right)^{\varepsilon}$$

Arbitrage entre les biens non durables et les biens durables :

$$\frac{n_t^{\frac{1}{\omega}} z_{h,t}^{\frac{1}{\varepsilon}} Aee_{h,t}^{\frac{1}{\zeta}}}{(A^{ef}e_{fh})_t^{\frac{1}{\zeta}}} = \frac{\gamma}{(1-\gamma)(1-v)f} \frac{(P^{ef}/A^{ef})_t + (\tau_{hf}/A^{ef})_t}{(1+\tau_t^c)}$$

Arbitrage entre la consommation d'énergie brune et d'énergie verte :

$$\frac{f}{1-f} \frac{(A^{ev}e_{vh})_t^{\frac{1}{\zeta}}}{(A^{ef}e_{fh})_t^{\frac{1}{\zeta}}} = \frac{(P^{ef}/A^{ef})_t + (\tau_{hf}/A^{ef})_t}{(P^{ev}/A^{ev})_t + (\tau_{hv}/A^{ev})_t}$$

Accumulation du stock de biens durables :

$$d_t = \frac{(1 - \delta_d)d_{t-1}}{1 + g_t^{al}} + x_t$$

Dépréciation du capital :

$$k_t = \frac{(1 - \delta_k)k_{t-1}}{1 + g_t^{al}} + i_t$$

Production :

$$\frac{y_t}{z_{f,t}} = (1 - \alpha)^{-\rho} (P_t^{zf})^\rho$$

Coût d'utilisation du capital :

$$P_t^k = \delta_k + r_t + \kappa_f \left((1 + r_t) \left(\frac{k_{t-1}}{k_{t-2}} - 1 \right) - \frac{1}{2} (1 + g^{al}) \left(\left(\frac{k_t}{k_{t-1}} \right)^2 - 1 \right) \right)$$

Consommation d'énergie verte des ménages et entreprises :

$$(A^{ev}e_v)_t = (A^{ev}e_{vh})_t + (A^{ev}e_{vf})_t$$

Consommations d'énergie brune des ménages et entreprises :

$$(A^{ef}e_f)_t = (A^{ef}e_{fh})_t + (A^{ef}e_{ff})_t$$

Exportations du bien générique :

$$ex_t = \bar{d}_t (er_t \bar{P}_t)^{-\xi}$$

Balance commerciale :

$$ex_t = (P^{ef}/A^{ef})_t (A^{ef}e_f)_t$$

Prix de l'énergie brune :

$$(P^{ef}/A^{ef})_t = er_t (\bar{P}^{ef}/A^{ef})_t$$

Condition de non-arbitrage des actifs financiers :

$$wal_t = b_t - \left(1 + \kappa_k \left(\frac{k_t}{k_{t-1}} - 1 \right) \right) k_t$$

Production du bien final :

$$y_t = \left[\alpha y_{L,t}^{\frac{\rho-1}{\rho}} + (1 - \alpha) \left[\beta \left(\frac{k_{t-1}}{1 + g_t^{al}} \right)^{\frac{\rho-1}{\rho}} + (1 - \beta) y_{E,t}^{\frac{\rho-1}{\rho}} \right] \right]^{\frac{\rho}{\rho-1}}$$

Énergie consommée pour la production :

$$y_{E,t} = \left[b y_{Ev,t}^{\frac{\theta-1}{\theta}} + (1 - b) y_{Ef,t}^{\frac{\theta-1}{\theta}} \right]^{\frac{\theta}{\theta-1}}$$

Production du bien final en fonction de la production de services de travail :

$$y_t = \alpha^{-\rho} (P_t^{yL})^\rho y_{L,t}$$

Condition de substitution énergétique dans la production :

$$\frac{\alpha}{(1-\alpha)(1-\beta)(1-b)} \left(\frac{y_{E,t}}{y_{L,t}} \right)^{\frac{1}{\rho}} \left(\frac{y_{Ef,t}}{y_{E,t}} \right)^{\frac{1}{\theta}} = \frac{p_t^{y_L}}{p_t^{y_{Ef}}}$$

Condition d'équilibre entre énergie brune et capital dans la production : $\left(\frac{y_{Ef,t}}{y_{E,t}} \right)^{\frac{1}{\theta}} \frac{\beta}{(1-\beta)(1-b)} \frac{p_t^{y_{Ef}}}{p_t^k} \rho = \frac{\frac{k_{t-1}}{(1+g_t^{al})y_{E,t}}}{(1+g_t^{al})y_{E,t}}$

Ratio des énergies vert et brune consommées pour la production :

$$\frac{y_E^f}{y_E^v} = \left(\frac{(1-b) p_E^v}{b p_E^f} \right)^{\theta}$$

Services de travail consommés pour la production :

$$y_L = \left(\frac{\lambda^2 p^{y_L}}{c} \right)^{\frac{\lambda}{1-\lambda}}$$

Prix des services de travail :

$$p_t^{y_L} = \frac{1}{(1-\lambda)^{1-\lambda} \lambda^{2\lambda}} (p^l)^{1-\lambda} c^{\lambda}$$

Services d'énergie brune consommés pour la production :

$$y_{Ef,t} = \left(\frac{\lambda^2 p_t^{y_{Ef}}}{c} \right)^{\frac{\lambda}{1-\lambda}} (A^{ef} e_{ff})_t$$

Prix des services d'énergie brune :

$$p_t^{y_{Ef}} = \frac{1}{(1-\lambda)^{1-\lambda} \lambda^{2\lambda}} \left((P^{ef}/A^{ef})_t + (\tau_f/A^{ef})_t \right)^{1-\lambda} c^{\lambda}$$

Services d'énergie verte consommés pour la production :

$$y_{Ev,t} = \left(\frac{\lambda^2 p_t^{y_{Ev}}}{c} \right)^{\frac{\lambda}{1-\lambda}} (A^{ev} e_{vf})_t$$

Prix des services d'énergie verte :

$$p_t^{y_{Ev}} = \frac{1}{(1-\lambda)^{1-\lambda} \lambda^{2\lambda}} \left((P^{ev}/A^{ev})_t + (\tau_v/A^{ev})_t \right)^{1-\lambda} c^{\lambda}$$

Taux de croissance de la productivité du travail :

$$g_t^{al} = \gamma_L \eta_L s h_{t-1}^l$$

Taux de croissance du progrès technique énergétique brun :

$$g_t^{aef} = \gamma_{Ef} \eta_{Ef} s h_{t-1}^f$$

Taux de croissance du progrès technique énergétique vert :

$$g_t^{aev} = \gamma_{Ev} \eta_{Ev} (1 - s h_{t-1}^l - s h_{t-1}^f)$$

Transferts totaux :

$$t_t = \tau^c(n_t + x_t) + (\tau_{hv}/A^{ev})_t(A^{ev}e_{vh})_t + (\tau_{hf}/A^{ef})_t(A^{ef}e_{fh})_t + (\tau_v/A^{ev})_t(A^{ev}e_{vf})_t + (\tau_f/A^{ef})_t(A^{ef}e_{ff})_t \\ + \lambda \left[p_t^l + (P^{ef}/A^{ef})_t(A^{ef}e_{ff})_t + (\tau_f/A^{ef})_t(A^{ef}e_{ff})_t + (P^{ev}/A^{ev})_t(A^{ev}e_{vf})_t \right. \\ \left. + (\tau_v/A^{ev})_t(A^{ev}e_{vf})_t \right] - s_t$$

Part du PIB allouée à la R&D :

$$s_t = \phi y_t$$

Équilibre sur le marché du bien générique :

$$y_t = i_t + n_t + x_t + \frac{\kappa_d}{2} \frac{(d_t - d_{t-1})^2}{d_{t-1}} + \frac{\kappa_f}{2} \frac{(k_t - k_{t-1})^2}{k_{t-1}} + ex_t + \frac{\lambda^2}{1-\lambda} (p_t^l + (P^{ef}/A^{ef})_t(A^{ef}e_{ff})_t \\ + (\tau_f/A^{ef})_t(A^{ef}e_{ff})_t + (P^{ev}/A^{ev})_t(A^{ev}e_{vf})_t + (\tau_v/A^{ev})_t(A^{ev}e_{vf})_t) + s_t$$

Évolution du prix de l'énergie brune :

$$(\overline{P^{ef}}/A^{ef})_t = \frac{1 + \pi_t^{ef}}{1 + g_t^{aef}} (\overline{P^{ef}}/A^{ef})_{t-1}$$

Évolution du prix de l'énergie verte :

$$(P^{ev}/A^{ev})_t = \frac{1 + \pi_t^{ev}}{1 + g_t^{aev}} (P^{ev}/A^{ev})_{t-1}$$

Équilibre budgétaire du Gouvernement :

$$(1 + \tau^c)(n_t + x_t) + (A^{ev}e_{vh})_t((P^{ev}/A^{ev})_t + (\tau_{hv}/A^{ev})_t) + (A^{ef}e_{fh})_t((P^{ef}/A^{ef})_t + (\tau_{hf}/A^{ef})_t) \\ + \frac{\kappa_d}{2} \frac{(d_t - d_{t-1})^2}{d_{t-1}} + a_t = p_t^t + (1 + r_t) \frac{a_{t-1}}{1 + g_t^{al}} + t_t$$

Enfin, deux variables annexes sont introduites pour simplifier les calculs :

$$X_\theta = \frac{1 + \tau_{v,t+1}^r}{1 + \tau_{f,t+1}^r} \frac{(1 + \gamma_{E_v})\eta_{E_v}}{(1 + \gamma_{E_f})\eta_{E_f}} \left(\frac{b}{(1-b)} \right)^\theta \left(\frac{(P_{t+1}^{ev} + \tau_{v,t+1})/A_{t+1}^{ev}}{(P_{t+1}^{ef} + \tau_{f,t+1})/A_{t+1}^{ef}} \right)^{(1-\lambda)(1-\theta)}$$

$$Y_\theta = \frac{1}{1 + \tau_{v,t+1}^r} \frac{(1 + \gamma_L)\eta_L}{(1 + \gamma_{E_v})\eta_{E_v}} \frac{\alpha^\rho}{((1-\alpha)(1-\beta)b)^\theta} \frac{(p_{t+1}^l)^{(1-\lambda)(1-\rho)}}{((P^{ev} + \tau_v)/A^{ev})_{t+1}^{(1-\lambda)(1-\theta)}} \\ * \left(\frac{b^\theta ((P^{ev} + \tau_v)/A^{ev})_{t+1}^{(1-\lambda)(1-\theta)} + (1-b)^\theta ((P^{ef} + \tau_f)/A^{ef})_{t+1}^{(1-\lambda)(1-\theta)}}{((1-\alpha)(1-\beta))^{1-\theta}} \right)^{\frac{\rho-\theta}{1-\theta}}$$

Annexe 2 : Calibrage du modèle Mouette

1. Élasticités de substitution

Pour la production, l'élasticité de substitution entre le capital et l'énergie est calibrée à $\sigma = 0,5$ et l'élasticité de substitution entre le travail et les autres intrants à $\rho = 0,5$, comme dans Henriet *et al.* (2014) dont la méthode d'estimation provient de Van der Werf (2008)²¹⁴, et en cohérence avec les élasticités présentes dans les modèles Mésange et FR-BDF²¹⁵. S'agissant de l'élasticité de substitution entre l'énergie verte et l'énergie brune, une valeur médiane entre celle de Labrousse et Perdereau (2023)²¹⁶ (élasticité de 0,2) et des élasticités supérieures à 1 (1,5 dans Fried, 2018) est retenue. Une élasticité inférieure à 1 permet en outre de souligner les rigidités à court terme de l'ajustement du mix énergétique, ce qui est réaliste selon Pottier²¹⁷ (2014) en raison de l'inertie des équipements installés. Ces faibles élasticités de substitution impliquent une faible substituabilité à court terme entre les deux types d'énergie, et, dans une moindre mesure, entre les différents facteurs de production, limitant l'adaptation rapide des systèmes productifs aux chocs énergétiques (tels que l'introduction d'une taxe carbone). À moyen-long terme, l'innovation, en améliorant l'efficacité énergétique, peut contribuer à l'atténuation des effets de tels chocs.

Pour les ménages, l'élasticité entre les biens non durables et l'agrégation des biens durables et de l'énergie est calibrée à $\omega = 0,99$, conformément à Henriet *et al.* (2014) et Fernandez-Villaverde et Krueger (2011)²¹⁸. L'élasticité de substitution entre les biens durables et l'énergie provient elle aussi de Henriet *et al.* (2014) et est estimée à $\varepsilon = 0,5$ en suivant une méthode proposée par Ogaki et Reinhart (1998)²¹⁹. Enfin, l'élasticité de substitution entre les deux formes d'énergie pour les ménages est la même que pour les entreprises ($\zeta = 0,5$).

2. Taux de croissance du progrès technique et part de la recherche allouée aux différents secteurs à l'état stationnaire

Pour le taux de croissance de la productivité du travail à l'état stationnaire, Henriet *et al.* (2014) avaient estimé et retenu une valeur de 1,6 %. Cependant, cette estimation est révisée à la baisse, en retenant $g^{al} = 1,2$ %.

Pour le taux de croissance annuel du progrès technique dans l'efficacité de l'énergie brune, l'estimation d'Henriet *et al.* (2014), à partir de données françaises, avec un taux $g^{aef} = 2$ %, est reprise. Pour le taux de croissance du progrès technique énergétique vert, la même valeur, c'est-à-dire $g^{aev} = 2$ %, est retenu, ce dernier étant peu abordé dans la littérature.

Pour les parts des investissements allouées aux trois secteurs de recherche (sh_i , sh_{ef} , et sh_{ev}), Henriet *et al.* (2014) renaient que 10 % de la recherche totale était allouée à l'efficacité énergétique, tandis que le reste était destiné à l'accroissement de la productivité du travail. Plus récemment, Jee et Srivastav (2024)²²⁰ estiment, à partir de données américaines, qu'en 2020, 7 % des brevets concernaient l'énergie verte et

²¹⁴ Van der Werf E. (2008), "Production functions for climate policy modeling: An empirical analysis", *Energy Economics*.

²¹⁵ Aldama P., Chahad M., Clerc P., Laffargue J-P. Lemoine M., Lepetit A., Turunen H., et Zhutova A. (2019), "The FR-BDF Model and an Assessment of Monetary Policy Transmission in France", Banque de France, *Documents de travail*, n° 736.

²¹⁶ Labrousse C. et Perdereau Y. (2023), "Geography versus Income: The Heterogeneous Effects of Carbon Taxation".

²¹⁷ Pottier A. (2015), « L'économie dans l'impasse climatique ».

²¹⁸ Fernandez-Villaverde J. et Krueger D. (2011), "Consumption and saving over the life cycle: How important are consumer durables?".

²¹⁹ Ogaki M. et Reinhart C.M. (1998), "Measuring intertemporal substitution: The role of durable goods", *Journal of Political Economy*. Les auteurs utilisent dans cet article une méthode en deux étapes qui combine une approche de cointégration pour l'estimation des paramètres de préférence avec la méthode généralisée des moments afin de prendre en compte la substitution intra-temporelle entre les biens de consommation non durables et les biens de consommation durables et les variations des taux d'intérêt réels qui affectent les coûts d'utilisation des biens durables.

²²⁰ Jee S.J. et Srivastav S. (2024), "Knowledge spillovers between clean and dirty technologies: Evidence from the patent citation network".

3 % l'énergie brune. Par déduction, les 90 % restants sont alloués à l'amélioration de la productivité du travail (comme dans *Henriet et al.*, 2014). Cette répartition est retenue $sh_l = 0,9$, $sh_{ef} = 0,03$ et $sh_{ev} = 0,07$.

2. Paramètres fondamentaux

Les paramètres fondamentaux sont des paramètres calibrés qui restent constants tout au long de l'exécution du modèle, en régime stationnaire comme pendant une période de transition (*cf.* Tableau 1). Les valeurs retenues par *Henriet et al.* (2014) sont retenues, sauf pour la part du PIB allouée à la recherche pour laquelle la valeur est fixée à $\phi = 2,22\%$ ²²¹ issue des données administratives françaises (*Luzy et Penard*, 2023²²²).

3. Quantités d'énergie consommées par les entreprises et les ménages

Les valeurs initiales de quatre catégories d'énergie, la quantité d'énergie verte consommée par les ménages, celle consommée par les entreprises, ainsi que les quantités d'énergie brune consommées par ces deux groupes, sont calibrées à partir des données de consommation d'énergie finale en France par secteur²²³. Ces données sont croisées avec celles de la SNBC 3 qui donnent les parts carbonées des consommations énergétiques des ménages et des sociétés non financières en 2024. En multipliant ces parts à la consommation d'énergie finale des ménages et des entreprises, les quantités d'énergies verte et brune souhaitées sont obtenues.

Tableau 1 : Consommations énergétiques vertes et brunes des ménages et firmes

	Ménages (millions de TEP)	Entreprises (millions de TEP)
Énergie brune	35	45
Énergie verte	22	31

4. Prix et taxes

Le prix d'exportation du bien standard, le taux de change et le prix international initial de l'énergie brune sont tous fixés à 1, comme dans *Henriet et al.* (2014).

Le prix initial de l'énergie verte (hors taxes énergétiques et hors TVA) est exprimé par rapport au prix unitaire de l'énergie brune hors taxes. Pour ce faire, les prix moyens hors taxes payés par les ménages et les entreprises en France pour le pétrole, le gaz (pour l'énergie brune) et l'électricité (pour l'énergie verte) en 2023²²⁴ sont pris pour en déduire le prix relatif de l'énergie verte. Ainsi, le prix initial de l'énergie brune est normalisé $P_{ef}=1$ et le prix initial de l'énergie verte est $P_{ev}=2,23$.

Ensuite, les taux de taxes sur l'énergie (verte et brune) pour les entreprises et les ménages doivent être estimés. Pour l'énergie brune pour les ménages (τ_{hf}) et les entreprises (τ_f), les taux de taxes (incluant la TVA) à partir de données de finances publiques pour 2023 suivants sont obtenus, $\tau_{hf}=0,76$ et $\tau_f=0,41$ ²²⁵. Pour les taxes payées sur l'électricité, un raisonnement similaire est fait en utilisant cette fois-ci les prix de

²²¹ Contre 2 % dans *Henriet et al.* (2014).

²²² *Luzy C. et Penard K. (2023), « Dépenses de recherche et développement expérimental en France : Résultats détaillés pour 2021 et premières estimations pour 2022 », Note d'information du SIES, n° 23.10.*

²²³ Ces données sont tirées de l'édition 2024 des « Chiffres clés de l'énergie » publiés par les ministères du Partenariat avec les territoires, de la Transition écologique et du Logement.

²²⁴ Ces données sont tirées de l'édition 2024 des « Chiffres clés de l'énergie » et d'études sur les prix du pétrole, du gaz et de l'électricité publiées les ministères du Partenariat avec les territoires, de la Transition écologique et du Logement.

²²⁵ La consommation d'énergie brune des ménages est taxée à 76 % du prix hors taxes moyen (pour les ménages et entreprises) de l'énergie brune consommée, tandis que la consommation d'énergie brune des entreprises est taxée à 41 % de ce même prix hors taxes.

2019, pour ne pas prendre en compte l'effet du bouclier tarifaire qui a abaissé les accises sur l'électricité à leur niveau plancher. Cela se traduit par un taux de taxe de 36 % pour les ménages et de 6 % pour les entreprises. En prenant comme référence $P_{ev} = 2,23$, les valeurs suivantes sont obtenues, $\tau_{hv}=0,80$ (niveau initial de taxe pour les ménages sur l'énergie verte) et $\tau_v=0,14$ (niveau initial de taxe pour les entreprises sur l'énergie verte). Enfin, le taux de taxe sur la consommation (TVA en France) est supposé s'élever à $\tau_c=12$ %, comme dans Henriet *et al.* (2014).

5. Paramètres macroéconomiques agrégés

Mouette nécessite l'estimation numérique de plusieurs ratios finaux. Le premier est le ratio du capital productif au PIB, noté k/y , qui est mis à jour en utilisant les données de l'Insee²²⁶. Une valeur de 1,6 est ainsi retenue.

Pour les ratios des biens durables sur la consommation énergétique brune des ménages (d/e_{fm}), de la production sur la consommation énergétique brune des entreprises (y/e_{ff}), et des biens non durables sur la consommation énergétique brune des ménages (n/e_{ff}), les valeurs présentes dans Henriet *et al.* (2014), estimées à partir des données des comptes nationaux français, sont conservées.

Enfin, la modélisation permet de définir des stocks initiaux de progrès technologiques vert et brun qui ne sont pas égaux. Cependant, par souci de simplicité, le stock initial de progrès technologique vert est de $A_{ev,t=0} = 1$ et celui de progrès technologique brun de $A_{ef,t=0} = 1$.

6. Actualisation

Le terme d'actualisation dans le modèle est $\mu = 3$ %, conformément à Henriet *et al.* (2014). Comme $r = \mu + i \cdot g^{al}$, où r représente le taux d'intérêt de l'économie, μ le taux de préférence pour le présent, i l'aversion à l'inégalité temporelle (ou l'élasticité intertemporelle de la consommation), et g^{al} le taux de croissance économique moyen, en prenant une valeur neutre $i = 1$ et $g^{al} = 1,2$ %, le taux d'intérêt de l'économie devient $r = 3 \% + 1 \cdot 1,2 \% = 4,2$ %.

²²⁶ Comptes nationaux de l'Insee.

7. Synthèse des paramètres

Tableau 2 : Paramètres du modèle Mouette calibrés par les auteurs

Paramètre	Valeur	Source
Paramètres fondamentaux		
Taux de préférence pour le présent : μ	0,03	Henriet et al. (2014)
Taux d'amortissement des biens durables : δ_d	0,09	F-V & Kruger (2011)
Taux d'amortissement du capital : δ_k	0,1	Henriet et al. (2014)
Élasticité-prix des exportations : ξ	0,6	Klein et Simon (2010)
Coefficient d'ajustement pour le stock de capital : κ_k	0	Henriet et al. (2014)
Coefficient d'ajustement pour les biens durables : κ_d	0	Henriet et al. (2014)
Taux moyen de TVA : τ^c	0,12	Henriet et al. (2014)
Coût d'une machine : c	0,1	Henriet et al. (2014)
Paramètre de combinaison dans la production : λ	0,3	Henriet et al. (2014)
Part du PIB allouée à la recherche : ϕ	0,0222	SIES (2022)
Élasticités de substitution		
Élasticité substitution bien non durable/autres biens : ω	0,99	F-V & Kruger (2011)
Élasticité substitution bien durable/énergie : ϵ	0,5	Henriet et al. (2014)
Élasticité substitution de la production : ρ	0,5	Henriet et al. (2014)
Élasticité substitution énergies (ménages) : θ	0,5	Pottier (2014)
Élasticité substitution énergies (entreprises) : ζ	0,5	Pottier (2014)
Valeurs à l'état stationnaire des variables endogènes		
Croissance efficacité énergie brune : g^{aef}	0,02	Henriet et al. (2014)
Croissance efficacité énergie verte : g^{aev}	0,02	Arbitrage DGT (reposant sur Henriet et al. (2014))
Croissance productivité travail : g^{al}	0,012	Hypothèse des auteurs
Part recherche allouée au travail : sh_l	0,9	Henriet et al. (2014)
Part recherche secteur brun : sh_f	0,03	Jee et Srivastav (2024)
Prix initial biens durables : $\bar{P}$	1	Henriet et al. (2014)
Taux de change : er	1	Henriet et al. (2014)
Ratio du capital productif au PIB : k/y	1,6	Insee
Ratio biens durables sur énergie brune ménages : d/e_{fm}	37	Henriet et al. (2014)
Ratio production sur énergie brune entreprises : y/e_{ff}	33	Henriet et al. (2014)
Ratio biens non durables sur énergie brune ménages : n/e_{ff}	23	Henriet et al. (2014)
Stock initial progrès technique vert : $A_{ev,t=0}$	1	Arbitrage DG Trésor pour simplifier
Stock initial progrès technique brune : $A_{ef,t=0}$	1	Arbitrage DG Trésor pour simplifier
Prix et taxes énergétiques		
Prix initial énergie brune : P_{ef}	1	Henriet et al. (2014)
Prix initial énergie verte : P_{ev}	2,23	MTE (2024), calculs DG Trésor
Taxe initiale ménages énergie brune : τ_{hf}	0,76	Calculs DG Trésor avec données Douanes, données constatées et l'édition 2024 des « Chiffres clés de l'énergie »
Taxe initiale entreprises énergie brune : τ_f	0,41	Calculs DG Trésor avec données Douanes, données constatées et l'édition 2024 des « Chiffres clés de l'énergie »
Taxe initiale ménages énergie verte : τ_{hv}	0,8	Calculs DG Trésor avec données Douanes, données constatées et l'édition 2024 des « Chiffres clés de l'énergie »
Taxe initiale entreprises énergie verte : τ_v	0,14	Calculs DG Trésor avec données Douanes, données constatées et l'édition 2024 des « Chiffres clés de l'énergie »

Dans ce type de modèle, il n'est pas possible d'estimer tous les paramètres économétriquement. Pour garantir que le modèle atteigne un état stationnaire, les valeurs sont obtenues en cohérence avec les spécifications du modèle et les paramètres calibrés. Parmi eux se trouvent tous les paramètres de répartition des différentes fonctions CES (Elasticité de Substitution Constante) pour les ménages et les entreprises. Les paramètres liés à la recherche, tels que la taille des innovations dans chaque secteur de recherche, ainsi que la probabilité de succès dans chaque secteur de recherche, sont également calibrés par le modèle.

Tableau 3 : Paramètres calculés par le modèle afin de garantir sa convergence vers un état stationnaire

Paramètre	Valeur
α la part du travail dans la production totale	0,6399
β la part du capital dans l'agrégat capital – énergie utilisé pour la production	0,9883
b la part de l'énergie verte dans l'agrégat énergétique utilisé pour la production	0,4755
γ la part des biens non durables dans la fonction d'utilité des ménages	0,7396
ν la part des biens durables dans l'agrégat biens durables-énergie consommé par les ménages	0,9854
f la part de l'énergie fossile efficace dans l'agrégat énergétique consommé par les ménages	0,5978
γ_L la probabilité de succès dans le secteur R&D en productivité du travail * η_{E_f} la probabilité de succès dans le secteur R&D en productivité du travail	productivité du travail 0,0133
γ_{E_f} la taille des innovations dans le secteur R&D en efficacité énergétique fossile * η_{E_f} la probabilité de succès dans le secteur R&D en efficacité énergétique fossile	0,6667
γ_{E_v} la taille des innovations dans le secteur R&D en efficacité énergétique verte * η_{E_v} la probabilité de succès dans le secteur R&D en efficacité énergétique verte	0,2857

Dans *Henriet et al.* (2014), seuls deux secteurs de recherche étaient modélisés, et les auteurs ont supposé que les probabilités de succès étaient identiques dans les deux secteurs. Dans *Mouette*, il est également supposé que les deux secteurs énergétiques partagent la même probabilité de succès.

Annexe 3 : Calibrage de la maquette de quantification de la perte de croissance potentielle induite par les investissements en décarbonation

Tableau 1 : Synthèse des variables et coefficients du cadre théorique sous-jacent à l'étude de l'impact du surcoût des investissements en décarbonation sur la productivité pour l'année de référence 2022

Variable	Symbole	Valeur	Source
Valeur ajoutée	Y	2 276 Md€ ₂₀₂₁	Insee
Stock de capital	K	3 701 Md€ ₂₀₂₁	Insee
Nombre de travailleurs	L	30 102 900 personnes	Insee
Investissements décarbonés	I_V	32 Md€ ₂₀₂₁	I4CE, Ademe, Rexecode, DGEC
Investissements émissifs	I_B	20 Md€ ₂₀₂₁	I4CE, Ademe, Rexecode, DGEC
Autres investissements	I_G	96 Md€ ₂₀₂₁	I4CE, Ademe, Rexecode, DGEC
Part du capital dans la valeur ajoutée	α	0,32	Bauer et Boussard (2020)
Élasticité de substitution entre le capital et le travail	θ	0,44	Mésange 2017
Élasticité de substitution entre le capital productif et le capital concerné par la transition bas-carbone	ρ	0,48	Henriet et al. (2014)
Élasticité de substitution entre les capitaux décarboné, émissif et autre	ϑ	3	Papageorgiou et al. (2017)
Taux de dépréciation	δ	0,11	Insee, BoFiP

Note : La fonction de production est initialisée à l'année 2022, les données d'I4CE mobilisées par les calculs de la DG Trésor débutant en 2023.

**Tableau 2 : Synthèse des variables et coefficients du cadre théorique sous-jacents calculés
par la DG Trésor en cohérence avec la spécification de la fonction de production
pour l'année de référence 2022**

Variable	Symbole	Valeur
Stock de capital productif	K_P	2 438 Md€ ₂₀₂₁
Stock de capital touché par la transition bas-carbone	K_{TE}	1 263 Md€ ₂₀₂₁
Stock de capital décarboné	K_V	272 Md€ ₂₀₂₁
Stock de capital émissif (brun)	K_B	171 Md€ ₂₀₂₁
Autre stock de capital touché par la transition bas-carbone	K_G	820 Md€ ₂₀₂₁
Investissements totaux	I	433 Md€ ₂₀₂₁ ^a
Investissements productifs	I_P	285 Md€ ₂₀₂₁
Investissements en lien avec la transition bas-carbone	I_{TE}	148 Md€ ₂₀₂₁
Préférence pour le capital productif	β_P	0,42 ^b
Préférence pour le capital en lien avec la transition bas-carbone	β_{TE}	0,11 ^b
Préférence pour le capital décarboné	γ_V	0,60 ^b
Préférence pour le capital émissif	γ_B	0,51 ^b
Préférence pour les autres capitaux liés à la transition bas-carbone	γ_G	0,87 ^b

^a L'investissement est calculé en cohérence avec le stock de capital et le taux de dépréciation retenu.

^b Ces paramètres sont des facteurs de préférence et non de pondération, de sorte que leur somme n'est pas nécessairement égale à 1 dans le cas d'une fonction de type CES.

Note : Le stock de capital est initialisé à partir des investissements et du taux de dépréciation. Les investissements bruns tels que calculés par les bases de données mobilisées étant faibles, le stock de capital apparaît bien inférieur aux capitaux verts et gris. Cela s'explique par le fait que ces bases de données ne couvrent qu'une part restreinte des investissements bruns, conduisant à en sous-estimer le stock.