

En chemin vers la neutralité carbone. Mais quel chemin ?

On the Way to Net Zero. But Which Way?

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

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

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

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

Mots-clés : changement climatique, modèle de Ramsey, technologie verte, modèle dynamique
Keywords: climate change, Ramsey model, green technology, dynamic model

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

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

Reçu en août 2023, accepté en juin 2024.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

1. Présentation du modèle

1.1. Secteur productif

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

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

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

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

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

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

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

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

1.2. Contraintes sur les émissions

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

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

Trois types de contraintes sont considérées :

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

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

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

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

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

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

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

1.3. Programme du planificateur social

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

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

- Équilibre ressources-emplois :

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

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

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

- Accumulation des capitaux brun et vert :

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

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

- Accumulation des émissions nettes de carbone : $E_t = E_{t-1} + e_t$, avec $e_t = e_b(\tilde{K}_{t-1}^b - \phi_t^b)$.
- Contrainte ZEN : $\phi_{T_E}^b = \tilde{K}_{T_E-1}^b$, puis $\forall t \geq T_E$: $\tilde{K}_t^b = \tilde{I}_t^b = 0$ et $K_t^b = \underline{K}_b$, et $\forall t \geq T_E + 1$: $\phi_t^b = 0$.
- Contraintes ponctuelles sur les émissions annuelles : $e_t \leq \bar{e}_t, \phi_t^b = \max\left(\tilde{K}_{t-1}^b - \frac{\bar{e}_t}{e_b}, 0\right)$.
- Budget carbone à ne pas dépasser (équation (1)).

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

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

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

$$W(K_{t-1}^b, K_{t-1}^v, E_{t-1}) = \max_{I_t^b, I_t^v, \phi_t^b} V(I_t^b, I_t^v, \phi_t^b | K_{t-1}^b, K_{t-1}^v, E_{t-1})$$

est la valeur atteinte par la fonction d'utilité indirecte, une fois optimisée par rapport aux variables de contrôle, toujours sous les mêmes contraintes que celles exposées ci-dessus.

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

1.4. Solutions stationnaires

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

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

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

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

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

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

1.5. Calibrage

1.5.1. Les formes fonctionnelles

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

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

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

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

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

1.5.2. Initialisation et paramètres structurels

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

Tableau 1 – Valeurs initiales et observées des grandeurs du modèle

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Sauf mention contraire, le budget carbone utilisé est de 3,93 GtCO₂éq correspondant à une cible de réchauffement de 1,6 °C, avec probabilité de réussite de 50 %. Il est déduit des budgets carbone planétaires estimés par Lamboll *et al.* (2023). La part de la France dans un budget mondial est considérée comme égale à sa part dans la population mondiale en 2019 (soit 0,88 %). Les équivalences entre budgets carbone pour la France et réchauffement sont fournis dans l'Annexe en ligne S3.

2. Résultats

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

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

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

9. Avec une élasticité de substitution de trois et un puits de carbone de 85 MtCO₂éq, compatible avec le puits naturel prévu par A. Quinet (2019) entre 75 et 95 MtCO₂éq, le coût d'abattement en 2050 ressort très proche de la VAC obtenue par A. Quinet (2019), soit 775 €/tCO₂.

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

Tableau 2 – Valeurs des paramètres du modèle calibré

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

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

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

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

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

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

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

2.1. Scénario sans contrainte carbone

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

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

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

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

2.2.1. Zéro émission nette à partir de 2050

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

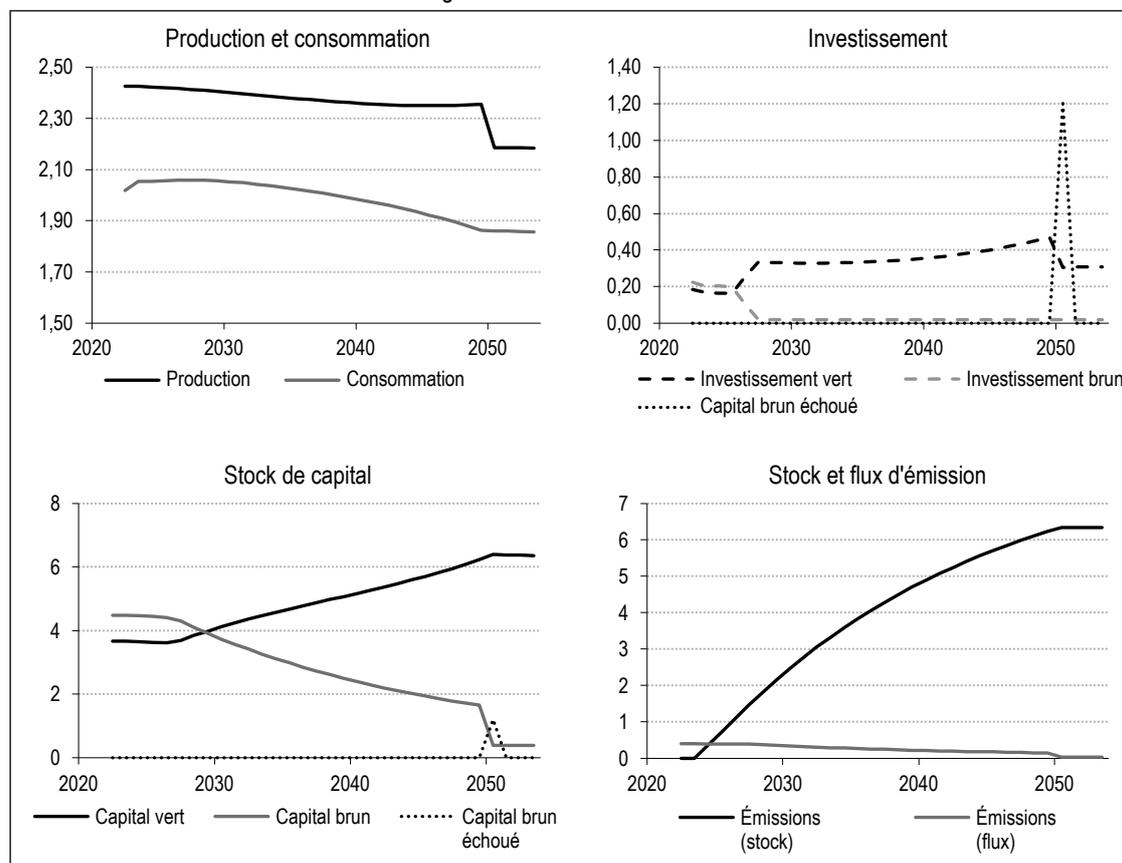
entre 2025 et 2027 pour ensuite se stabiliser. L'investissement vert augmente à nouveau progressivement à l'approche de 2050, ce qui permet de lisser la consommation et d'atténuer sa baisse induite par l'important échouage du capital brun en 2050. En effet, celui-ci provoque une brusque décarbonation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

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

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

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

Figure I – Scénario ZEN 2050



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

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

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

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

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

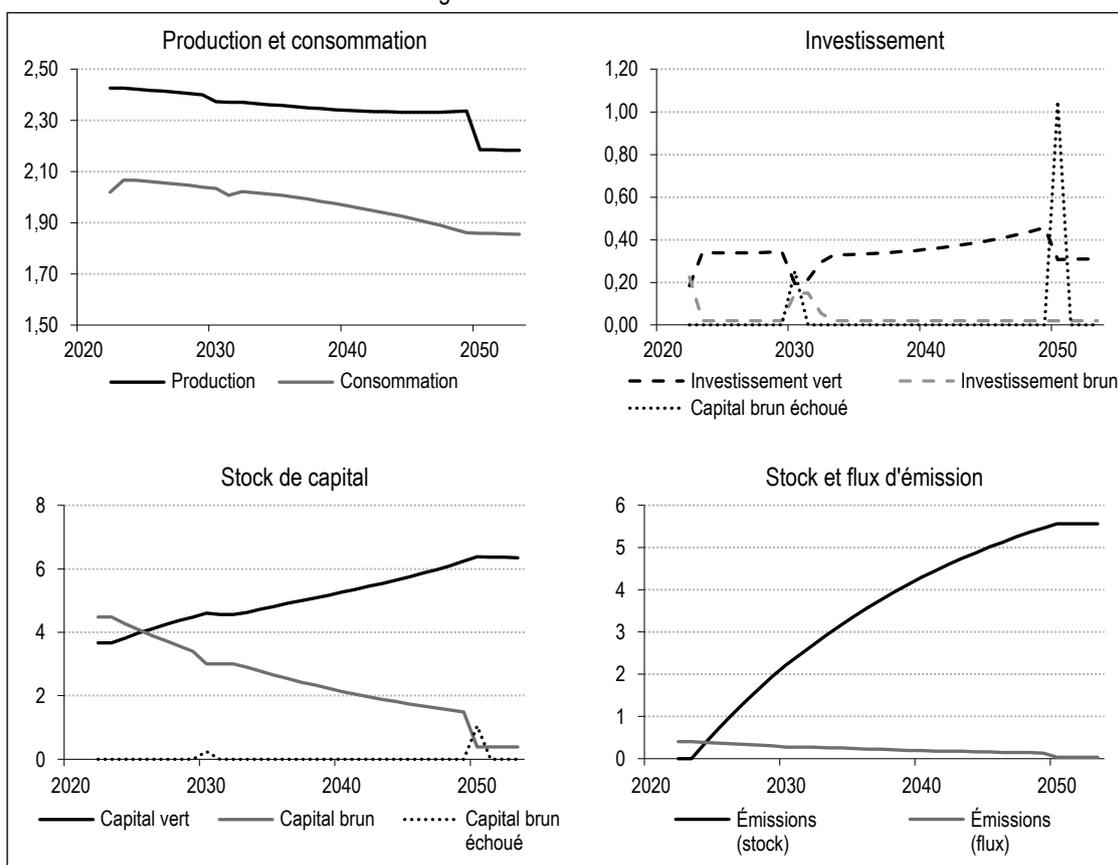
Cela révèle l'importance de l'effort qu'il reste à faire après 2030, même quand le défi *Fit for 55* a été précédemment relevé avec succès. En miroir de la chute brutale du stock de capital brun, les émissions chutent et restent faibles tout au long de la décennie 2040.

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

La simulation présente la trajectoire optimale de décarbonation permettant de respecter le budget carbone national à 1,6 °C (soit 3,93 GtCO₂éq) tout en atteignant l'objectif ZEN en 2050. Ici, il y a donc deux contraintes : une sur les flux d'émissions (ZEN à partir de 2050), l'autre sur le stock (le cumul d'émissions devant rester inférieur au budget).

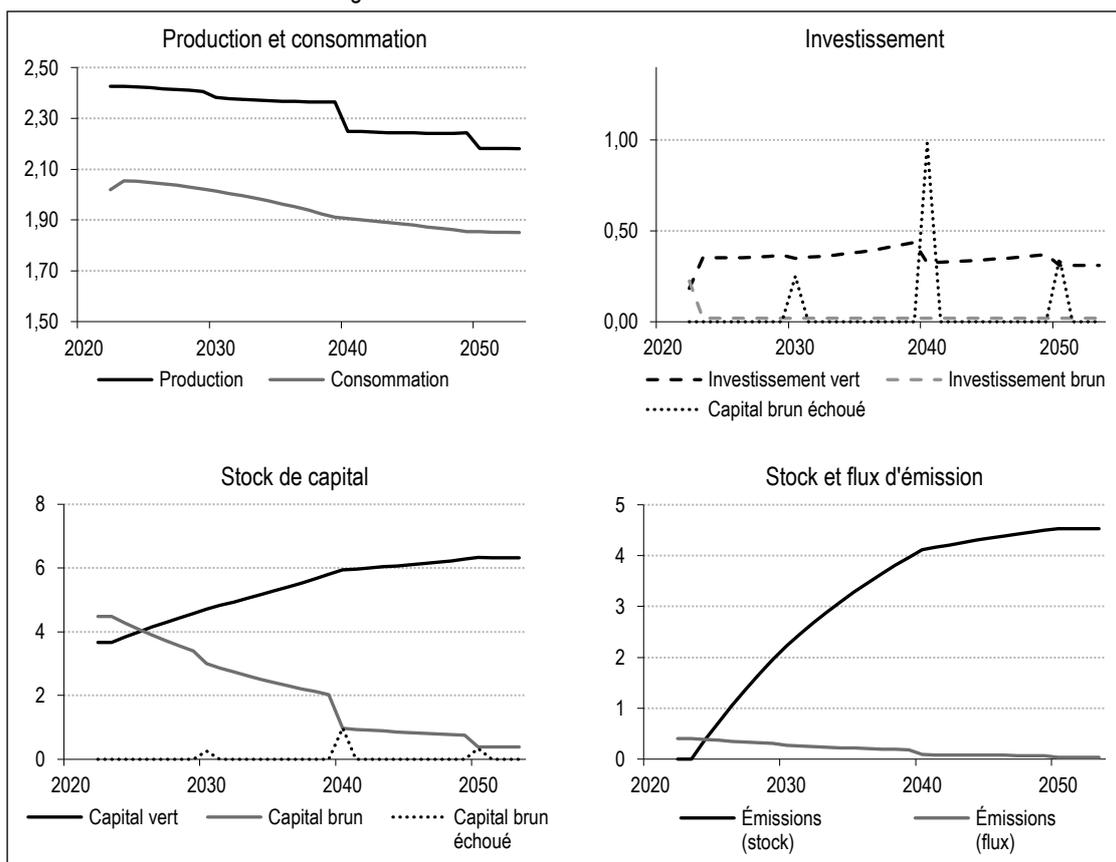
12. Dans des simulations non présentées ici, nous avons appliqué la contrainte *Fit for 55* seulement en 2030 et pas les années suivantes, ce qui correspondrait à une interprétation à la lettre de cet engagement : en 2030, l'investissement vert s'annule et l'investissement brun augmente nettement ; dès 2032 l'investissement brun retombe au niveau qui stabilise le capital brun résiduel. Le capital brun augmente en 2031, alors qu'il stagne quand la contrainte *Fit for 55* s'applique aux années ultérieures également. Bien que le surcroît de capital brun après 2030 soit modéré par rapport à ce qui est reporté figure II, il s'accompagne d'émissions supplémentaires qui cumulées jusqu'en 2050 représentent 0,15 GtCO₂éq.

Figure II – Scénario *Fit for 55*



Note : cf. figure I.

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



Note : cf. figure I.

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

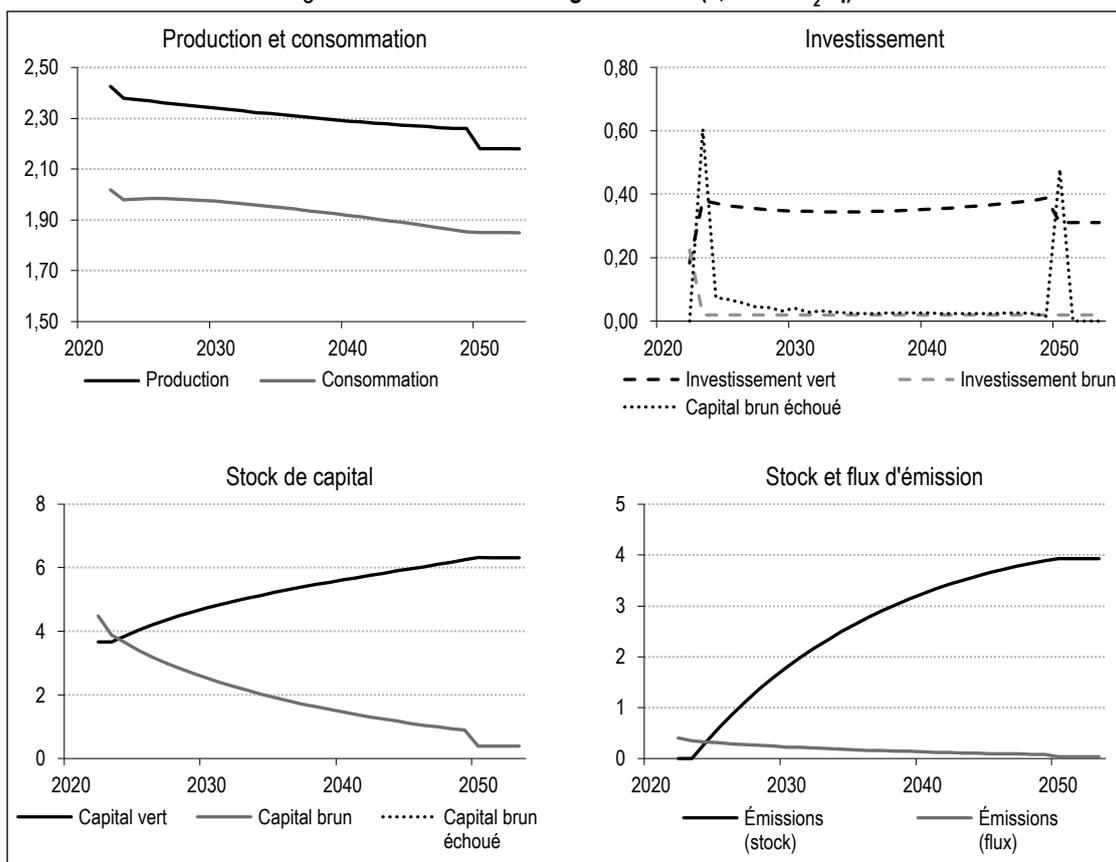
En outre, cette disparition de l'investissement brun ne suffit pas pour réduire suffisamment les émissions de GES. Un échouage du capital a lieu régulièrement, mais principalement à deux moments : une fois, massivement, la première année (14 % du capital brun initial), et une seconde fois en 2050 (11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

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

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

2.2.5. Enseignements des différentes politiques d'atténuation climatique

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

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

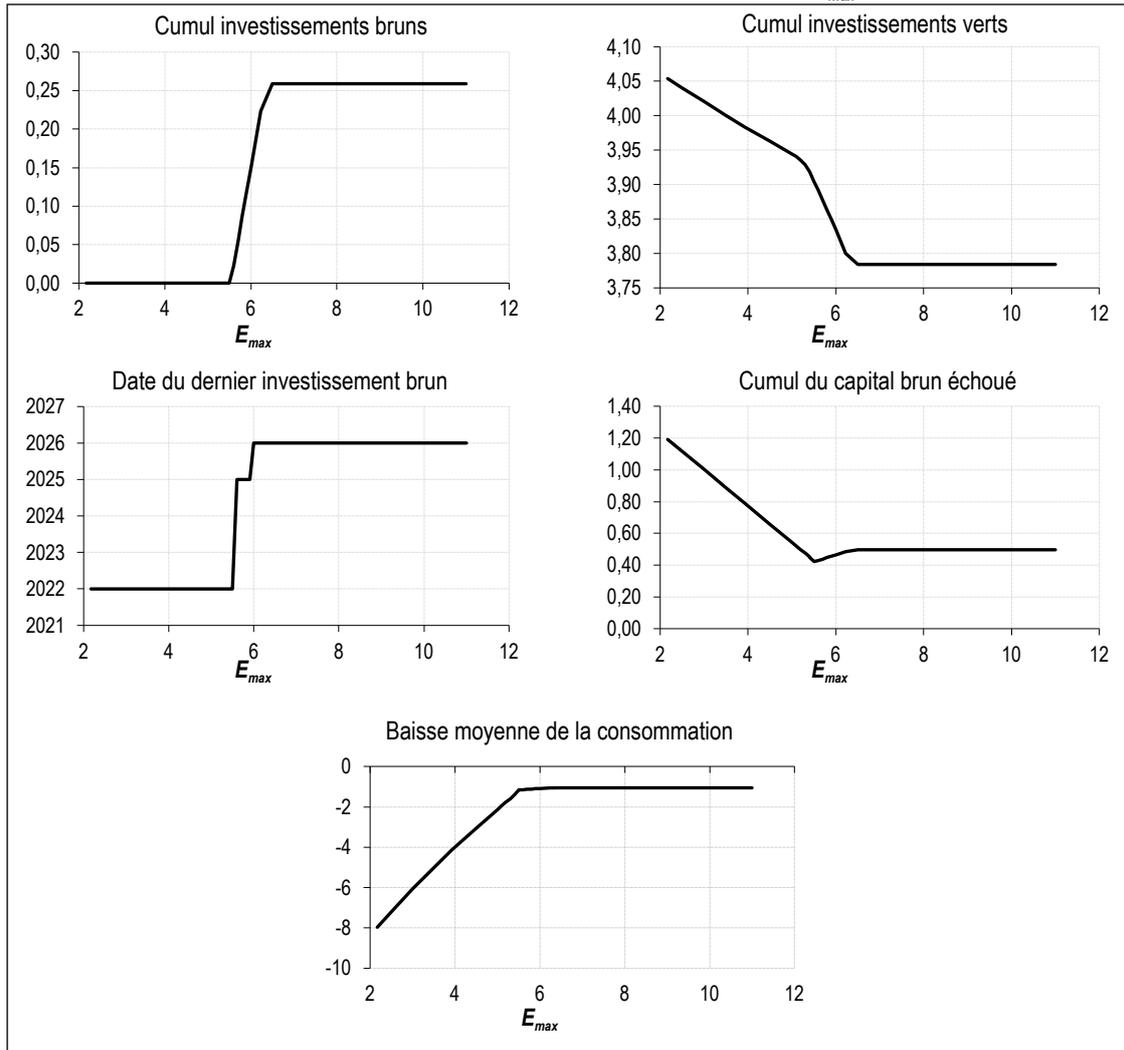
Note : cf. figure I.

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

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

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

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



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

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

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

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

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

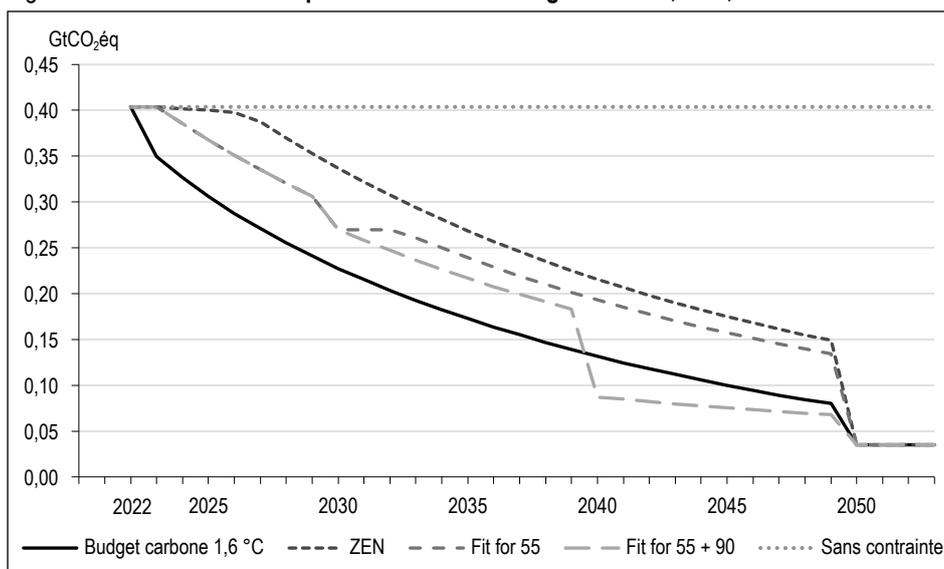
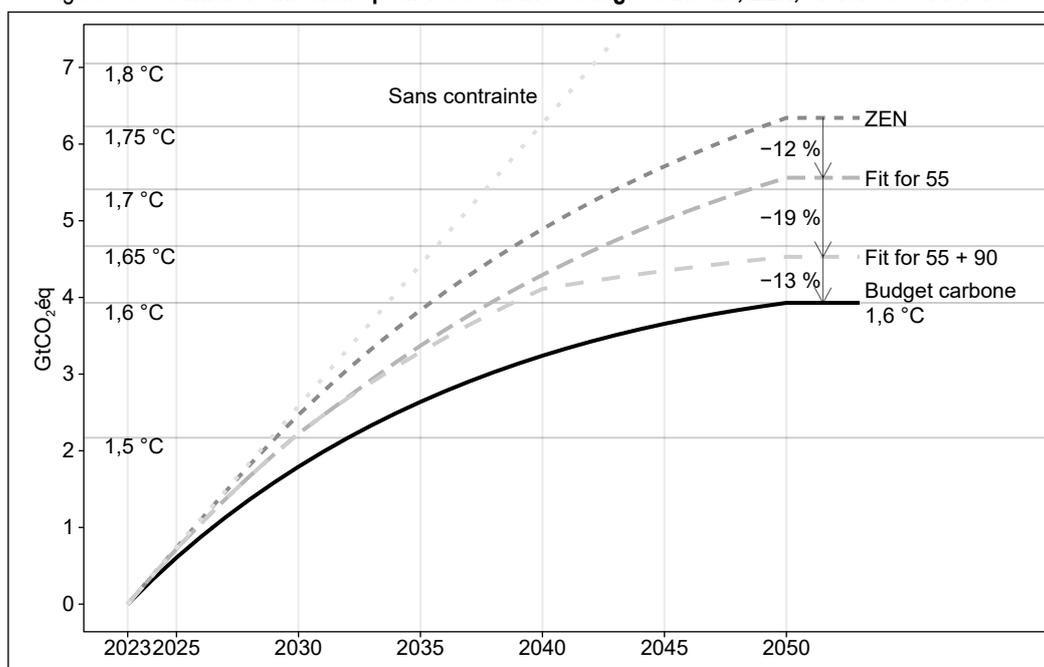


Figure VII – Cumul d'émissions pour les scénarios budget carbone, ZEN, *Fit for 55* et *Fit for 90*



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

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

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

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

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

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

de bien-être donnée, la trajectoire des investissements et de l'échouage peut être optimisée de manière à réduire les émissions du système productif, et donc les dommages climatiques. Ainsi le scénario ZEN et le respect d'un budget carbone à 1,75 °C génèrent le même niveau de bien-être et de consommations cumulées sur toute la période, mais les émissions cumulées jusqu'en 2050 sont légèrement plus élevées dans le scénario ZEN que dans le scénario budget carbone (6,3 vs 6,2 GtCO₂éq). Par construction, le scénario budget carbone maximise le bien-être sous contrainte de respecter ce budget carbone, ce qui assure qu'à cumul de GES donné, ce scénario offre une perte d'utilité moindre qu'avec des contraintes ponctuelles sur les émissions. En particulier, un échouage anticipé peut avoir lieu dans un scénario budget carbone, ce qui n'est pas le cas face à ces contraintes ponctuelles.

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

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

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

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

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

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

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

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

Des cibles intermédiaires fréquentes apparaissent importantes pour des objectifs ambitieux, mais pas pour des objectifs peu ambitieux. Dans les scénarios respectant un budget carbone élevé, supérieur à 5,5 GtCO₂éq, il n'y a pas d'échouage anticipé (sur 2023-2049) ; les solutions des scénarios avec des jalons tous les 10, 5 et 2 ans, choisis en accord avec la chronique d'émissions du scénario budget carbone correspondant, coïncident avec celle du scénario budget carbone (figure IX avec un budget carbone associé à 1,75 °C, de 6,23 GtCO₂éq). Ainsi, le problème fondamental de l'instrument

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

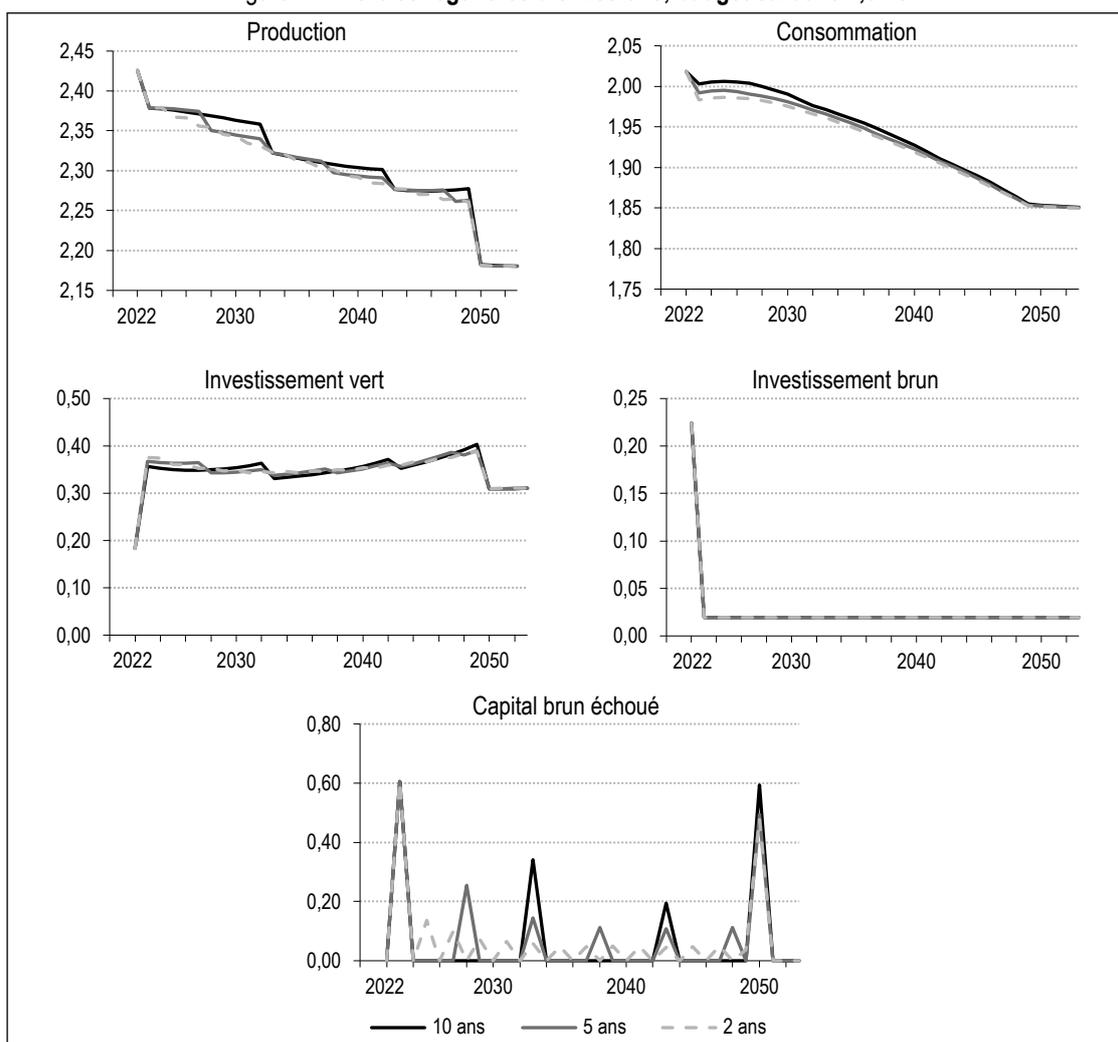


Tableau 4 – Des cibles ponctuelles d'émissions plus rapprochées rapprochent l'économie de la trajectoire optimale respectant le budget carbone à 1,6 °C

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

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

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

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

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

2.4. Une transition retardée dégrade le bien-être

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

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

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

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

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

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

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

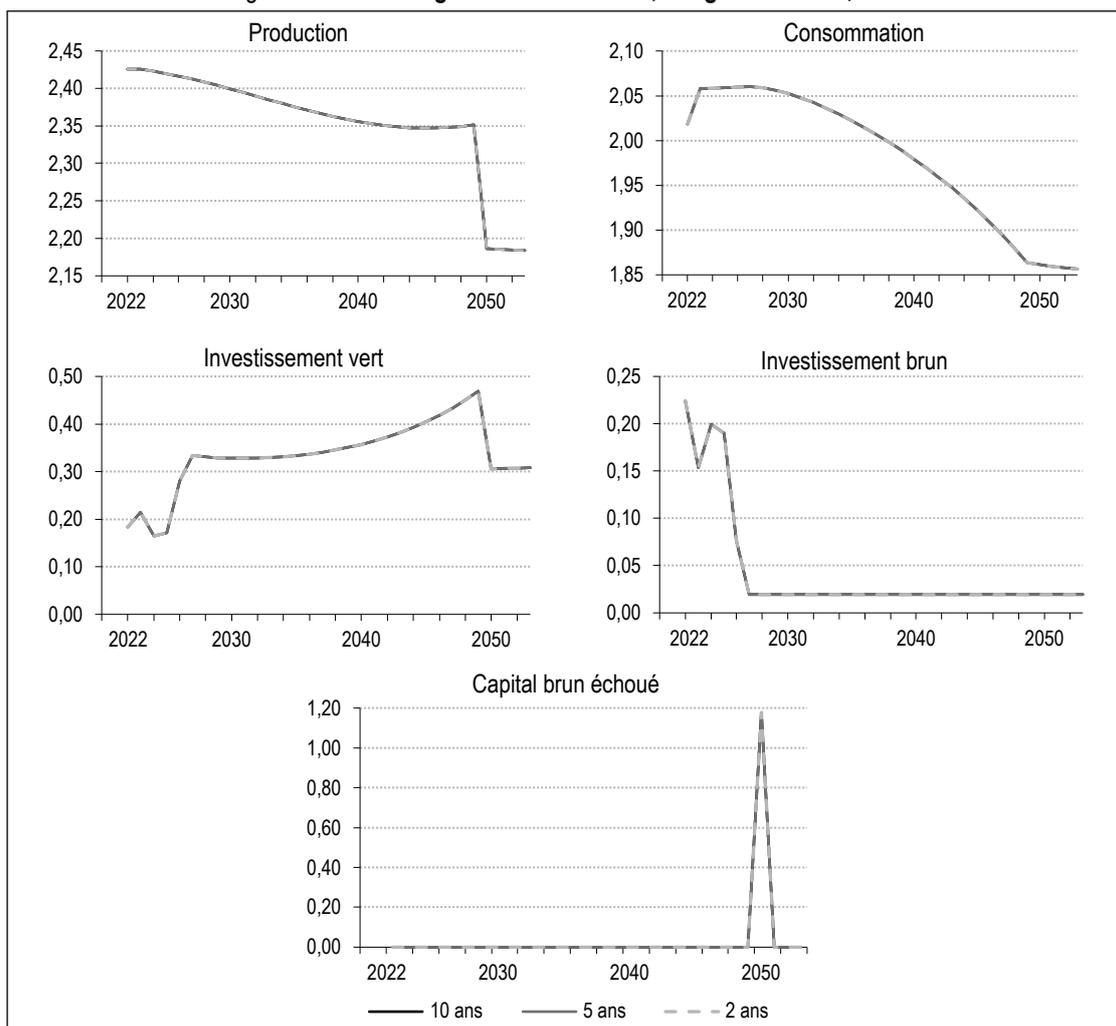


Figure X – Budget carbone 1,6 °C avec différentes dates de démarrage de la transition

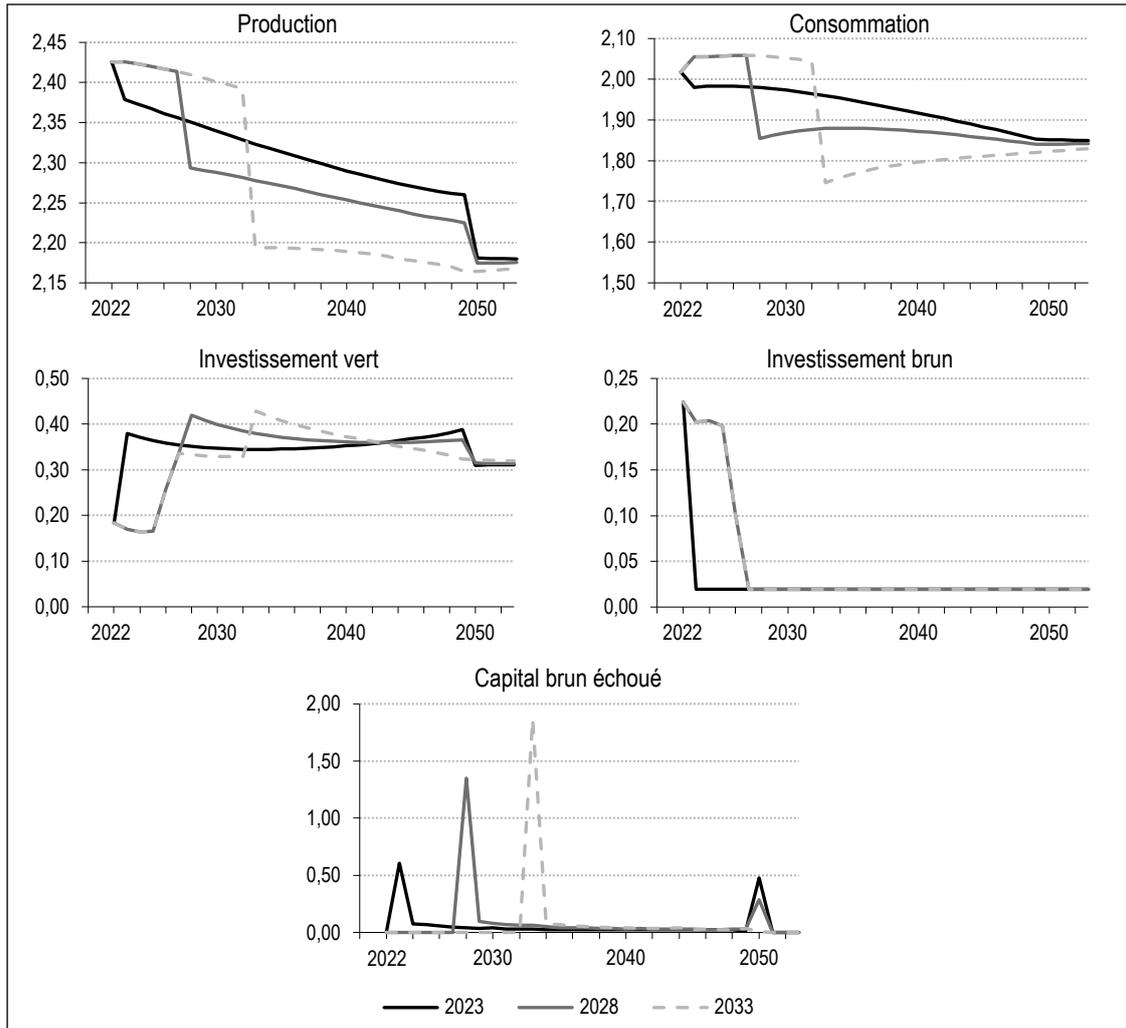
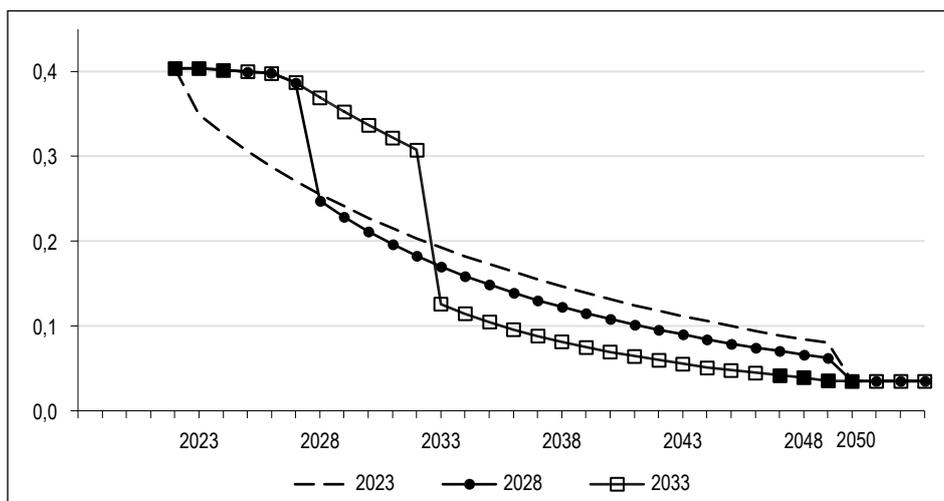


Figure XI – Flux d'émission pour le budget carbone 1,6 °C avec différentes dates de démarrage de la transition



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

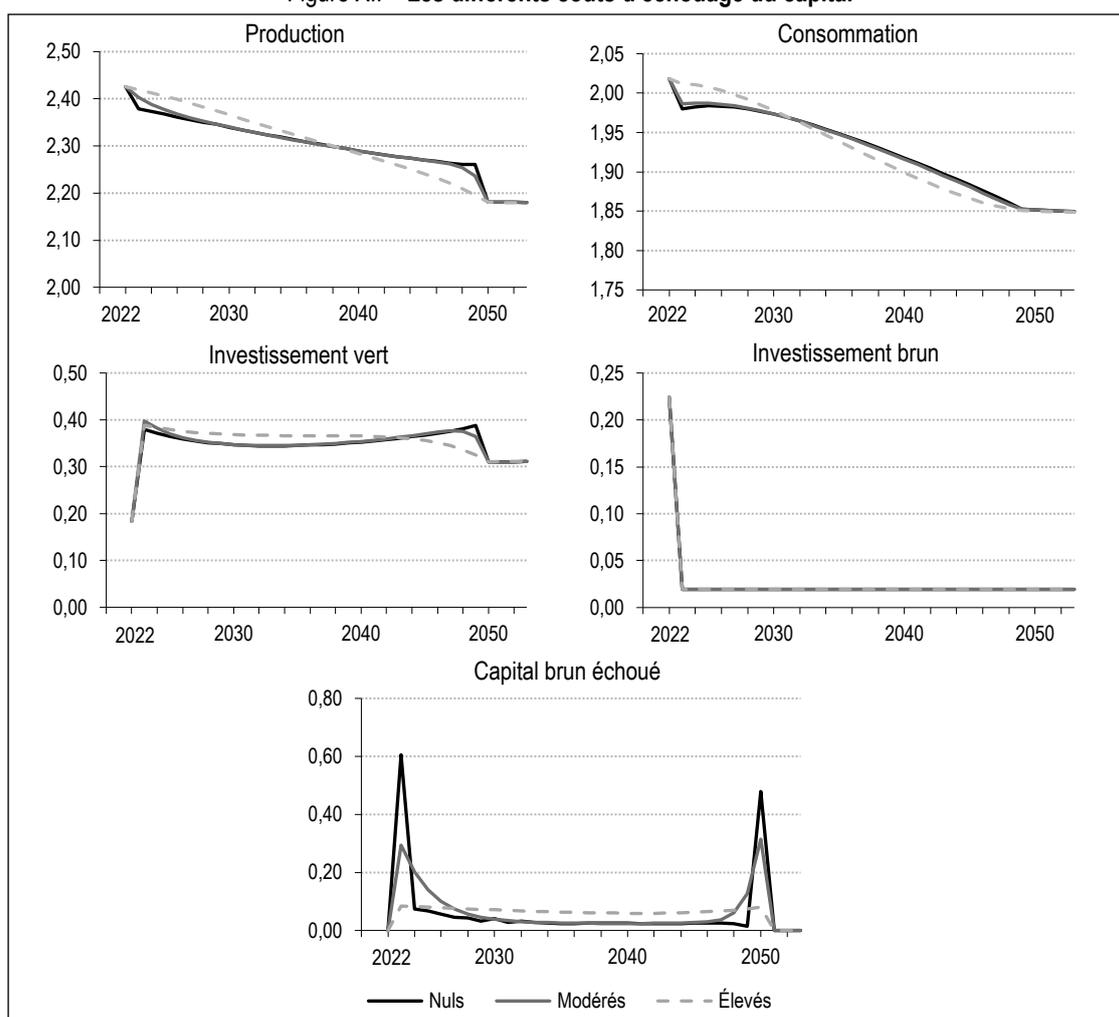
rend en aucun cas plus crédible : au contraire, tout retard implique une chute d'autant plus brutale de la consommation lorsque la politique d'émissions est finalement ajustée à l'objectif.

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

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

Note : voir tableau 3.

Figure XII – Les différents coûts d'échouage du capital



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

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

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

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

* *
*

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

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

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

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

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

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

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

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

Lien vers l'Annexe en ligne :

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

BIBLIOGRAPHIE

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

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