

# LES INCIDENCES ÉCONOMIQUES DE L'ACTION POUR LE CLIMAT

---

## Marché du capital

Rapport thématique

Pierre-Louis Girard (coord.)





# LES INCIDENCES ÉCONOMIQUES DE L'ACTION POUR LE CLIMAT

## Marché du capital

---

### Rapport thématique

**Coordinateur**

**Pierre-Louis Girard** (Direction générale du Trésor)

Riyad Abbas (Insee), Romain Schweizer (France Stratégie)  
et Jérôme Trinh (Direction générale du Trésor)

**MAI 2023**

  
**FRANCE STRATÉGIE**

  
**MINISTÈRE  
DE L'ÉCONOMIE,  
DES FINANCES  
ET DE LA SOUVERAINETÉ  
INDUSTRIELLE ET NUMÉRIQUE**  
*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

Direction générale  
du Trésor

---

## Présentation

Par une lettre du 12 septembre 2022, la Première ministre a confié à Jean Pisani-Ferry une mission d'évaluation des impacts macroéconomiques de la transition climatique, afin que ces incidences soient mieux prises en compte par les décideurs dans l'ensemble des politiques publiques. Selma Mahfouz, inspectrice générale des finances, est la rapporteure générale de la mission. Le secrétariat est assuré par France Stratégie.

Une première note de cadrage est parue en novembre 2022 sous le titre « [L'action climatique : un enjeu macroéconomique](#) » (Note d'analyse, n° 114, France Stratégie).

Remis à la Première ministre en mai 2023, le rapport final intitulé [Les incidences économiques de l'action pour le climat](#) présente la synthèse des travaux de la mission.

Ces travaux ont également donné lieu à la publication de onze rapports thématiques, rédigés par des équipes issues de différentes institutions. L'ensemble de ces documents sont disponibles sur le site de France Stratégie :

- [Bien-être](#), coordonné par Didier Blanchet,
- [Compétitivité](#), coordonné par Lionel Fontagné,
- [Dommages et adaptation](#), coordonné par Xavier Timbeau,
- [Enjeux distributifs](#), coordonné par Vincent Marcus,
- [Indicateurs et données](#), coordonné par Nicolas Carnot et Nicolas Riedinger,
- [Inflation](#), coordonné par Stéphane Dees,
- [Marché du capital](#), coordonné par Pierre-Louis Girard,
- [Marché du travail](#), coordonné par Carole Hentzgen et Michaël Orand,
- [Modélisation](#), coordonné par Jérôme Trinh,
- [Productivité](#), coordonné par Anne Epaulard,
- [Sobriété](#), coordonné par Aude Pommeret.

Ce rapport thématique consacré à l'impact de la transition climatique sur le marché du capital était placé sous la direction de Pierre-Louis Girard (Direction générale du Trésor), en collaboration avec Riyad Abbas (Insee), Romain Schweizer (France Stratégie) et Jérôme Trinh (Direction générale du Trésor).

Il a bénéficié des commentaires et de l'expertise des contributeurs suivants : Louis Daumas (Cired) ; Nicolas Carnot, Matthieu Lequien, Alain Quartier-la-Tente et Sébastien Roux (Insee) ; Willy Bréda, Benoît Campagne, Maël Forcier, Stéphanie Jallet, Thomas Kergonou Jimenez, Antoine Leclercq et Jules Parolin (Direction générale du Trésor).



## SOMMAIRE

---

<b>Synthèse</b> .....	<b>5</b>
<b>Introduction</b> .....	<b>7</b>
<b>Chapitre 1 – Définitions du concept de capital échoué</b> .....	<b>9</b>
1. Quels actifs et secteurs sont concernés par le risque de capital échoué ? .....	9
2. Les déterminants de la formation de capitaux échoués.....	12
<b>Chapitre 2 – Méthodes d'évaluation de la valeur économique des capitaux physiques échoués</b> .....	<b>17</b>
1. Méthode de l'inventaire permanent.....	17
2. Méthode des flux de trésorerie actualisés .....	18
3. Méthode des tableaux d'entrées-sorties.....	20
<b>Chapitre 3 – Estimations du montant de capital physique échoué</b> .....	<b>21</b>
1. Études multisectorielles .....	23
2. Industries extractives d'énergies fossiles (pétrole, gaz et charbon).....	25
3. Éléments comparatifs sur l'ampleur des actifs exposés au risque d'obsolescence accéléré entre la France et l'Allemagne.....	27
<b>Chapitre 4 – Actifs financiers exposés au risque de transition</b> .....	<b>29</b>
1. Impacts de la transition écologique sur la situation financière des agents institutionnels .....	29
2. Canaux de transmission et tentatives de chiffrage du risque d'échouage d'actifs financiers.....	30

## **Chapitre 5 – Évaluations *ex ante* de l'impact macroéconomique d'une obsolescence accélérée d'une partie du stock de capital.....35**

- 1. Revue des mécanismes de transmission au niveau macroéconomique ..... 35**
- 2. Intégration du capital échoué dans les modèles macroéconomiques..... 37**
- 3. Quelle élasticité de substitution entre facteurs de production retenir ? ..... 40**

## **Conclusion et recommandations ..... 43**

### **ANNEXES**

**Annexe 1 – Présentation du modèle-jouet de l'Insee pour étudier le capital échoué dans le cadre de la transition écologique..... 47**

**Annexe 2 – Revue des élasticités de substitution..... 59**

**Bibliographie..... 61**



## SYNTHÈSE

---

Le marché du capital est principalement exposé à un risque de capital échoué. De façon générale, ce concept désigne une perte de valeur significative, potentiellement irréversible, du stock de capital, physique, immatériel et humain d'une part, productif et résidentiel d'autre part. Par ailleurs, les capitaux échoués risquent d'entraîner une dévalorisation des actifs financiers sous-jacents, pouvant toucher l'ensemble des agents institutionnels (ménages, entreprises, banques, institutions financières, administrations publiques). Ce risque de capital échoué est provoqué par la transition écologique (en lien avec le déclassement de capitaux carbonés ou mobilisés par des secteurs à fortes émissions carbonées), mais également par le changement climatique (du fait notamment d'événements climatiques extrêmes entraînant des destructions de capitaux) non abordé ici.

Les évaluations existantes des montants de capital échoué ont majoritairement porté sur le secteur de l'extraction d'énergies fossiles en lien avec le risque de transition, mais ont négligé les autres secteurs pouvant également être exposés, à savoir 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 tourisme, ainsi que les risques climatiques.

À partir de l'étude réalisée par l'Irena en 2017, *a priori* la plus complète en matière de secteurs couverts, le flux annuel de capital productif dévalué au niveau mondial pourrait s'élever à 0,5 point de PIB 2019 en cas de transition ordonnée et à 1 point de PIB en cas de transition retardée à 2030. Le choc toucherait les secteurs du bâtiment, de l'extraction d'énergies fossiles et, plus marginalement, de l'industrie et de la production d'électricité à partir des énergies fossiles. Au niveau de l'Union européenne, le choc serait respectivement de 1 à 2 points de PIB et il toucherait quasi exclusivement les secteurs du bâtiment. Néanmoins, ces chiffrages restent incertains : ceux-ci sont largement conditionnés par les méthodes de chiffrage retenues et, plus largement, le risque de capital échoué dans les secteurs de la construction et résidentiel ainsi que les conséquences macroéconomiques sous-jacentes restent difficilement appréciables. En outre, ce travail permet de souligner la nécessité de mettre en place une stratégie de décarbonation crédible de moyen-long terme, de sorte à donner suffisamment de visibilité aux agents économiques.

En matière d'implications financières, les évaluations cherchent à quantifier la part du stock actuel d'actifs financiers exposés au risque de transition, et portent de nouveau majoritairement sur le secteur des énergies fossiles. Les résultats de ces travaux sont relativement convergents, mais très incertains : le stock d'actifs financiers exposés est évalué autour de 8 % du PIB, pour l'ensemble du monde, comme pour les États-Unis et pour l'Union européenne. Pour la France, 5 % à 6 % du stock de crédits dans les secteurs de la construction, de l'immobilier, de la production électrique et des commerces sont exposés au risque de transition.

D'un point de vue théorique, une obsolescence accélérée du stock de capital pourrait se traduire par un renchérissement du coût du capital et par un surplus d'investissement pour compenser la perte de capital, avec un risque d'effet d'éviction sur la consommation et les autres investissements. Les évaluations *ex ante* de l'impact macroéconomique d'une obsolescence accélérée d'une partie du stock de capital, dans lesquelles ce choc est généralement modélisé par une hausse du taux de dépréciation du stock de capital ou une baisse du taux d'utilisation du capital, font état d'un impact négatif sur l'activité et l'emploi.





## INTRODUCTION

---

La transition écologique implique une réallocation intersectorielle et infrasectorielle des facteurs de production, travail et capital – qui, pour ce dernier, n’a fait l’objet que de peu d’études. Les conclusions des travaux existants pour l’emploi peuvent être mobilisés pour en inférer l’ampleur. Ainsi, le FMI (2022)<sup>1</sup> insiste sur le fait que ces réallocations seraient contenues sectoriellement, des entreprises/secteurs à forte intensité carbone (la production d’énergies fossiles, par exemple) vers ceux décarbonés (comme les énergies renouvelables) ou contribuant à la décarbonation de l’économie (notamment la construction).

En outre, la réallocation portant sur le capital touchera en premier lieu le stock d’actifs financiers (recomposition des portefeuilles des investisseurs et des banques) et les flux d’investissements en capital physique, pour lesquels une distinction entre bruts et nets doit être faite au niveau agrégé. La substitution de capital aux énergies fossiles, induite par la transition écologique, implique une forte augmentation des besoins d’investissements en décarbonation, dits bruts. Toutefois, les effets de recomposition (des secteurs à forte intensité capitalistique et carbone vers des secteurs intensifs en emploi), le bouclage macroéconomique et les rigidités sur la réallocation des facteurs de production font que l’évolution nette de l’investissement est *a priori* indéterminée. L’évolution du stock de capital physique installé, aux niveaux agrégé et sectoriel, est largement conditionnée par une double contrainte de faisabilité de conversion (d’actifs carbonés à décarbonés) et de rentabilité. Dès lors que l’actif ne peut pas être converti pour un autre usage économique, il risque d’être considéré comme un actif dit échoué, ce qui constitue un des principaux risques pour le marché du capital.

---

<sup>1</sup> FMI (2022), « [A Greener Labor Market: Employment, Policies, and economic transformation](#) », chapitre 3 du *World Economic Outlook: War Sets Back the Global Recovery*, avril.





## CHAPITRE 1

# DÉFINITIONS DU CONCEPT DE CAPITAL ÉCHOUÉ

---

### 1. Quels actifs et secteurs sont concernés par le risque de capital échoué ?

Le concept de capital échoué désigne tout capital installé dont la valeur économique diminue de façon potentiellement irréversible et plus rapidement que sa dépréciation comptable théorique, du fait :

- de la transition écologique : la décarbonation de l'appareil production conduit à substituer des technologies à faible émission en gaz à effet de serre (GES) à des technologies à forte émission de sorte que la valeur de ces dernières diminue ;
- du changement climatique : la matérialisation d'événements climatiques extrêmes entraîne la destruction de capital dans les zones géographiques exposées, ainsi qu'une réduction des investissements, conduisant à une diminution de la valeur actuelle du stock.

Pour les risques liés à la transition écologique, les catégories de capital productif suivantes peuvent être distinguées, selon qu'il s'agit 1) de technologie à forte émission en GES ou 2) de capital reposant sur une utilisation intensive de ce type de technologie.

- Au sein des immobilisations corporelles :
  - les bâtiments et infrastructures, avec, du côté des ménages, les passoires thermiques non rénovées qui devraient être progressivement interdites à la location et/ou à la vente (en particulier pour les plus petites surfaces dont la taille est proche de la limite légale pour la location, pour lesquelles il ne sera matériellement pas possible de les isoler), et, du côté des entreprises, tout bâtiment utilisé pour produire un bien carboné (usines de véhicules thermiques, raffineries, centrales de production électrique à partir d'énergies fossiles, etc.) ou complémentaire à ce type de bien (une station essence, par exemple), qui pourrait ne pas être reconverti en vue d'une production décarbonée ;

- les machines et biens d'équipement, intervenant dans la production de biens carbonés (les machines utilisées pour produire les véhicules thermiques, les appareils d'extraction d'énergies fossiles, etc.) et utilisés par les ménages (le chauffage au fioul, par exemple) ;
  - les transports, avec en premier lieu les véhicules thermiques (du fait, par exemple, de la mise en place de zones à faibles émissions dans les villes qui en interdit l'accès pour les véhicules les plus polluants, ou de l'interdiction de leur vente dans l'Union européenne après 2035).
- Au sein des immobilisations incorporelles :
    - les brevets relatifs à des technologies à fortes émissions de GES (dans l'agriculture pour des pesticides par exemple, dans l'extraction d'énergies fossiles et, plus largement, dans la production de tout bien à fortes émissions en GES – comme les brevets relatifs aux véhicules thermiques).

Dans le cas du risque climatique, le stock de capital dans les zones géographiques les plus exposées aux événements climatiques extrêmes (tsunamis, ouragans, tempêtes) dont la fréquence et l'amplitude devraient s'accroître, ainsi qu'à une dégradation permanente de l'environnement (désertification, érosion, inondation, etc.), seront en premier lieu concernés. Au-delà des risques de destruction, la variation des températures – notamment extrêmes, comme les canicules et vagues de froid – pourrait détériorer les actifs physiques (en premier lieu les bâtiments), se matérialisant par une hausse du taux de dépréciation associé. Enfin, le changement climatique, avec l'évolution des conditions météorologiques, aura un impact sur les actifs agricoles en fonction de l'incidence sur les rendements.

Sur la base de cette première classification, les secteurs les plus directement touchés par le risque de capital échoué lié aux deux types de risques (de transition et climatique) seraient les industries extractives d'énergies fossiles, les industries manufacturières, la production d'électricité, la construction, le secteur immobilier et les transports. Les autres secteurs pourraient également être exposés en fonction des effets de réseau et de l'utilisation de ces technologies carbonées comme intrant. Plus spécifiquement, les secteurs de l'agriculture et du tourisme seront exposés au risque climatique.

En parallèle, le risque d'échouage de capitaux productifs touche également le capital humain et les actifs financiers. Sur le premier point, le déclassement des capitaux productifs, voire la disparition de certaines activités associées (la production de véhicules thermiques, l'extraction d'énergies fossiles, etc.), devrait s'accompagner d'un déclassement des compétences des travailleurs directement touchés (les ouvriers qualifiés de l'industrie automobile, par exemple). De plus, la matérialisation du changement climatique risque d'avoir des incidences sur la productivité des travailleurs (l'augmentation de la fréquence, de la durée et de l'intensité des vagues de chaleur touchera ainsi négativement la santé des personnes). Sur le second point, les capitaux échoués risquent

d'entraîner une perte de valeur significative pour les détenteurs (intermédiaires bancaires et financiers, ménages, entreprises, administrations publiques) des actifs financiers sous-jacents (actions, obligations ou crédits des entreprises des secteurs directement exposés).

Il est à noter que le concept de capital échoué est en premier lieu utilisé dans le domaine financier. C'est pourquoi la plupart des articles sur le sujet utilise le terme d'« actif échoué », qui englobe l'ensemble des immobilisations financières (actions, obligations, etc.), corporelles (bâtiment, bien d'équipement, etc.) et incorporelles (brevet, etc.) dont la valeur économique pourrait être significativement réduite du fait des risques de transition et des risques climatiques. Le concept de « capital échoué » relève davantage du champ économique et englobe les différents types d'actifs cités précédemment ainsi que le capital humain (compétences).

Par ailleurs, il est à noter que plusieurs définitions plus fines du capital échoué ont été proposées dans la littérature, en fonction du type d'actifs concernés, des secteurs touchés et des causes. L'Irena (2017)<sup>1</sup> passe en revue les principales définitions du capital échoué qui ont été proposées dans la littérature :

- pour l'AIE (2013)<sup>2</sup>, les capitaux échoués désignent tous les investissements déjà réalisés, dont la rentabilité économique est devenue nulle du fait de changements sur les marchés et/ou dans la régulation, provoqués par le réchauffement climatique ;
- Carbon Tracker Initiative (2015)<sup>3</sup> propose la même définition mais en ajoutant le risque de transition (écologique) comme cause supplémentaire ;
- Generation Foundation (2013)<sup>4</sup> les définit comme des actifs qui perdent de la valeur économique bien avant leur date d'amortissement théorique, du fait de changements dans la régulation, sur les marchés, dans les technologies, de comportements ou environnementaux.

L'Irena ajoute la notion d'irréversibilité dans sa définition du capital échoué. Le concept est défini comme la valeur comptable restante (c'est-à-dire la différence entre la valeur comptable initiale et les dépréciations annuelles successives) d'un capital qui a dû être déclassé de manière irréversible avant la fin de sa durée de vie théorique, du fait de la

---

<sup>1</sup> 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 Paper, juillet.

<sup>2</sup> AIE (2013), [Redrawing the Energy Climate Map. World Energy Outlook Special Report](#), Agence internationale de l'énergie, juin.

<sup>3</sup> Carbon Tracker Initiative (2015), [The \\$2 Trillion Stranded Assets Danger Zone: How Fossil Fuel Firms Risk Destroying Investor Returns](#), rapport, juillet.

<sup>4</sup> Generation Foundation (2013), « [Stranded carbon assets: Why and how carbon risks should be incorporated in investment analysis](#) », octobre.

transition écologique (pour atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050), et sans que cette valeur restante ne puisse être récupérée en totalité.

Jackson (2018)<sup>1</sup> complète cette liste de définitions avec Caldecott *et al.* (2013)<sup>2</sup> et Paun *et al.* (2015)<sup>3</sup>, pour qui un actif est dit échoué lorsque l'entreprise a enregistré des dépréciations ou des provisions non anticipées ou prématurées (sans discussion des causes).

## 2. Les déterminants de la formation de capitaux échoués

Jackson (2018) propose une discussion des différents déterminants, interconnectés, de la formation de capitaux échoués :

- **la temporalité des efforts de décarbonation** : une transition désordonnée, retardée et précipitée pour atteindre la neutralité carbone en 2050, dans laquelle les politiques d'atténuation seraient repoussées jusqu'à 2030 avec différentes contraintes sectorielles et internationales, impliquerait des évolutions plus fortes et plus rapides de la demande énergétique par rapport à une transition ordonnée, où les politiques climatiques sont mises en place de façon graduelle, augmentant le stock de capital échoué et son coût économique ;
- **la structure des entreprises touchées** : le choc risque d'être d'autant plus important que l'intensité capitalistique est élevée et que les actifs ont une durée de vie longue et sont difficilement réaffectables (comme dans le secteur de l'extraction et l'acheminement d'énergies fossiles, notamment concernant le pétrole et le gaz naturel) ;
- **la structure des secteurs et les interconnexions économiques** : une modification dans la dynamique concurrentielle entre entreprises d'un secteur donné, ainsi que dans les secteurs situés en amont (coût de production) et en aval (demande adressée) pourrait limiter les capacités d'investissements des entreprises/secteurs touchés, voire conduire à une perte de capital (par exemple, une baisse du prix du baril de pétrole, provoquée par une augmentation de la production par des entreprises/pays dont les coûts de production sont faibles, pourrait contraindre les entreprises dont le coût marginal de production devient supérieur au prix à sortir du marché, notamment si elles anticipent une baisse persistante du prix, et conduire à une dépréciation de leurs actifs – comme pour les fracturations hydrauliques) ;

---

<sup>1</sup> Jackson A. (2018), « A stock-flow consistent framework for the analysis of stranded assets and the transition to a low carbon economy », thèse de doctorat en environnement et développement durable à l'université de Surrey.

<sup>2</sup> Caldecott B., Howarth N. et McSharry P. (2013), *Stranded Assets in Agriculture: Protecting Value from Environment-Related Risks*, *Smith School of Enterprise and the Environment*, août.

<sup>3</sup> Paun A., Knight Z. et Chan W. S. (2015), « *Stranded assets: what next?* », HSBC Global Research, avril.

- **l'innovation dans l'énergie** : l'émergence de nouvelles technologies peut accélérer le déclassement des capitaux en lien avec les énergies fossiles déjà installés (processus de destruction créatrice) – à titre d'illustration, l'émergence d'une technologie améliorant l'efficacité des énergies renouvelables, ou diminuant leurs coûts d'installation, devrait réduire la demande pour les énergies fossiles, pouvant conduire à la sortie accélérée des entreprises les moins profitables et à la perte de leur capital. Le lien entre innovation et capital échoué est discuté plus en détail dans l'encadré 1 ;
- **un changement de régulation ou de politique économique** : les mesures de réglementation (comme l'interdiction de vente de véhicules thermiques neufs à partir de 2035 dans l'Union européenne) ou la fin des mesures fiscales de soutien aux énergies fossiles auront un impact significatif sur la profitabilité des entreprises et sur le revenu des ménages concernés, avec des effets indirects (*via* le marché des véhicules d'occasion dans le cas de l'exemple précédent) ;

#### Encadré 1 – Progrès technique et risque de capital échoué

Les changements technologiques entrent souvent dans le périmètre de ce qui est associé aux risques de transition. Le secteur de l'extraction d'énergies fossiles (pétrole, gaz et charbon) est particulièrement exposé à ce type de risque : il n'est pas soumis à des « cycles de produits » définis dans un temps donné (comme d'autres produits/secteurs où ces cycles peuvent être annuels dans le cadre des smartphones, quinquennaux dans le cas des automobiles, voire décennaux dans le cas des constructeurs d'avion par exemple), mais au contraire quasi illimités. Ainsi, Bonneuil et Fressoz (2016)<sup>1</sup> rappellent que l'histoire énergétique longue présente davantage le profil d'une accumulation que celui d'une succession de transitions. Aussi ce constat suggère-t-il que les entreprises extractives pourraient ne pas être à même de s'adapter sans coûts significatifs à la transition, si les énergies renouvelables venaient à être déployées rapidement<sup>2</sup>.

Il est toutefois nécessaire de tenir compte du fait que, dans la majorité des autres secteurs industriels, les entreprises et les investisseurs internalisent les processus de destruction créatrice, sous la contrainte des évolutions de marché (Thomä *et al.*,

<sup>1</sup> Bonneuil C. et Fressoz J.-B. (2016), *L'Évènement anthropocène. La Terre, l'histoire et nous*, Paris, Éditions du Seuil.

<sup>2</sup> Il convient néanmoins de rappeler que les entreprises du secteur extractif disposent généralement de capacités financières importantes qui pourraient leur permettre de se redéfinir en tant qu'énergéticiens « généralistes » (fossile et renouvelable) à court terme puis à majorité renouvelables à moyen terme sans dommage majeur pour leur profitabilité ou leur modèle d'affaire.

2017<sup>1</sup>). Dans le cadre de la transition écologique, un risque pourrait alors être que les entreprises attendent l'émergence d'une nouvelle technologie plutôt que d'entamer à court terme une décarbonation de leur appareil productif, au risque de voir les technologies mobilisées obsolètes, engendrant un surcoût. Les conclusions de la littérature quant aux stratégies des entreprises face à l'incertitude qui entoure les modalités de la transition suggèrent néanmoins qu'elles pourraient être davantage pro-actives qu'attentistes (Wang, 2022<sup>2</sup>).

La prise en compte du progrès technique comme potentiel facteur de risque en lien avec la transition exigée par le changement climatique implique donc des analyses fines incorporant cette hétérogénéité intersectorielle. En partant du principe que les entreprises intègrent les nécessaires modifications de leurs pratiques, Thomä *et al.* (2017) proposent de prendre en compte différents éléments comme l'ampleur ou la vitesse du changement auxquelles lesdites entreprises devront s'adapter pour évaluer la facilité d'un secteur à absorber le choc. Ce type d'analyse est utilisé pour déterminer la vulnérabilité ou, à l'inverse, la résilience des entreprises à la transition. Le cabinet Carbon Delta (2019)<sup>3</sup> utilise par exemple une évaluation qualitative du portefeuille de brevets d'un certain nombre d'entreprises (établie à partir d'une base de données internationale) pour évaluer leur capacité d'adaptation à la transition.

Par ailleurs, il convient de prendre en compte le fait que les changements technologiques, et plus largement comportementaux et réglementaires, ne se produisent pas depuis un état stationnaire préexistant mais plutôt dans des contextes sociotechniques spécifiques, qui comprennent à la fois un ensemble de tendances ou de transformations, abruptes ou s'inscrivant dans le long terme (démographiques, culturels, etc.). C'est en particulier le cas pour la transition du secteur automobile : l'électrification se fait en parallèle d'un recul des ventes, d'une polarisation du marché, d'une réduction de la place accordée aux voitures dans les villes européennes, etc. Pour représenter au mieux cette complexité, des approches transdisciplinaires autour de concepts tels que les systèmes sociotechniques ont émergé (Geels *et al.*, 2017<sup>4</sup>), en tentant de prendre en compte les multiples dimensions du rôle du progrès technique dans la transition.

<sup>1</sup> Thomä J., Fulton M., Ramirez L., Röttmer N. et Duran M. (2017), « [Changing colors. Adaptive capacity of companies in the context of a transition to a low-carbon economy](#) », 2 °C Investing Initiative, juillet.

<sup>2</sup> Wang J. (2022), « [Waiting or acting: The effects of climate policy uncertainty](#) », Job Market Paper, septembre.

<sup>3</sup> Carbon Delta (2019), « [Modelling the impact of climate change on the financial risk of investments](#) », Finance for the Future.

<sup>4</sup> Geels F. W., Sovacool B. K., Schwanen T. et Sorrell S. (2017), « [The socio-technical dynamics of low-carbon transitions](#) », *Joule*, vol. 1(3), novembre, p. 463-479.



De plus, le risque de transition dû au progrès technique dépend des politiques de recherche et développement, qui influent sur le processus d'innovation, et celles des droits de propriété intellectuelle (les brevets), qui constituent le cadre institutionnel des incitations à l'innovation et d'accès aux nouvelles technologies. En la matière, il importe de souligner que la puissance publique joue un rôle central : elle est souvent à l'origine de l'émergence d'un signal suffisamment fort pour stimuler l'innovation bas carbone, que ce soit par des approche de soutien à la demande (introduction d'un prix du carbone par des taxes ou un marché de quotas, tarifs préférentiels de rachats de l'électricité d'origine renouvelable, etc.) ou à l'offre (subventions à la R&D, création de pôle de compétitivité, réglementations contraignantes sur les secteurs bruns, etc.).

Par exemple, Calel et Dechezleprêtre (2016)<sup>1</sup> montrent que l'introduction du système d'échange de quotas d'émission au sein de l'Union européenne s'est accompagnée d'une augmentation du dépôt de brevets de la part des entreprises concernées. En outre, l'investissement dans le développement et l'adoption de technologies bas carbone dépend du degré de coopération internationale (Bonnet *et al.*, 2018).

- **un changement dans les conditions de financement** : une réallocation des financements, provoquée par l'évolution des anticipations des investisseurs et des banques, aura un impact sur les perspectives de croissance des entreprises touchées par le risque de capital échoué (les sociétés bancaires et financières anticipant une baisse de la valeur des actifs des entreprises du secteur de l'extraction d'énergies fossiles pourraient par exemple durcir les conditions de financement, voire réduire leurs offres de financement) ;
- **un changement de normes sociales/préférences des ménages et des entreprises** : le déclenchement et la répétition d'événements climatiques extrêmes, ainsi que les politiques de transition écologique, modifieront la structure de la demande adressée au secteur productif concerné (une transition orientée vers davantage de sobriété réduirait la consommation des ménages, de certains biens, voire agrégée, conduisant à la dépréciation d'actifs caractéristiques de la consommation de masse, tels que les supermarchés). Il est toutefois difficile en pratique de distinguer les changements de préférence dus à la transition écologique,

<sup>1</sup> Calel R. et Dechezleprêtre A. (2016), « [Environmental policy and direct technological change: Evidence from the European carbon market](#) », *Review of Economics and Statistics*, vol. 98(1), p. 173-191.

de ceux liés à des évolutions sociétales (c'est notamment le cas les supermarchés aux États-Unis, dont la part diminue dans le commerce, indépendamment des politiques de transition).

Enfin, Caldecott *et al.* (2021)<sup>1</sup> mentionnent **le risque juridique** : des entreprises des secteurs les plus émetteurs de gaz à effet de serre pourraient être poursuivies en justice et condamnées pour leur responsabilité dans le changement climatique, les contraignant à devoir passer des provisions importantes, qui réduiraient significativement leurs profits, leur capacité d'investissement, voire pouvant conduire à leur sortie des marchés.

La formation de capital échoué peut ainsi être anticipée, par exemple, dès lors qu'elle relève d'une politique de transition écologique visant à réduire l'usage de technologies carbonées, ou stochastique, en fonction de la matérialisation des effets du changement climatique ou d'innovations technologiques.

---

<sup>1</sup> Caldecott B., Clark A., Koskelo K., Mulholland E. et Hickey C. (2021), « [Stranded assets: Environmental drivers, societal challenges, and supervisory responses](#) », *Annual Review of Environment and Resources*, vol. 46, octobre, p. 417-447.



## CHAPITRE 2

# MÉTHODES D'ÉVALUATION DE LA VALEUR ÉCONOMIQUE DES CAPITAUX PHYSIQUES ÉCHOUÉS

---

Indépendamment de la méthode utilisée, le montant de capital échoué est systématiquement calculé en comparant deux scénarios, le premier modélisant l'impact de la transition écologique et/ou du changement climatique et le second de référence n'en tenant pas compte.

Trois méthodes principales peuvent être différenciées pour calculer des montants de capitaux échoués. La première consiste à s'appuyer sur la méthode de l'inventaire permanent – majoritairement utilisée pour calculer des stocks de capital – où le stock d'une période donnée est égal à la somme du stock de la période précédente déprécié à un taux constant et des investissements. La deuxième s'appuie sur un modèle généralement utilisé en finance, le modèle des flux de trésorerie actualisés, où la valeur d'un actif à une période donnée est égale à la somme des revenus futurs actualisés qu'il pourra générer. La dernière méthode consiste à recourir à des tableaux multirégionaux d'entrées-sorties pour tenir compte des relations intersectorielles et interrégionales dans le calcul des montants de capital échoué. Les trois sous-parties suivantes détaillent ces trois méthodes.

### 1. Méthode de l'inventaire permanent

**Une première approche, dite comptable, consiste à s'appuyer sur la méthode de l'inventaire permanent, pour calculer de façon *bottom-up* des stocks de capital échoué par type d'actifs et/ou secteur d'activité.**

Dans chacun des scénarios, un stock de capital est calculé selon la méthode de l'inventaire permanent, pour chaque actif (bâtiment, bien d'équipement, etc.) et/ou secteur (industrie, construction, etc.) défini au préalable. De façon générale, le stock de capital dans le scénario  $S$ , pour l'actif  $i$  du secteur  $j$  à la période  $t$ , noté  $K_{i,j,t}^S$ , est égal au

stock de la période précédente déprécié à un taux  $\delta_{i,j,t}^S$  et augmenté des investissements  $I_{i,j,t}^S$ , soit formellement :

$$K_{i,j,t}^S = (1 - \delta_{i,j,t}^S)K_{i,j,t-1}^S + I_{i,j,t}^S$$

Les scénarios se différencient par leurs chroniques de taux de dépréciation et/ou d'investissements. Les taux de dépréciation sont généralement calculés en cohérence avec la durée de vie théorique des actifs correspondants dans le scénario de référence et sont ajustés sur la base d'hypothèses visant à atteindre des cibles données dans les scénarios de transition écologique et/ou de changement climatique<sup>1</sup>. Les chroniques d'investissements proviennent de modèles technicoéconomiques ou macroéconomiques annexes, en tenant compte des ajustements des taux de dépréciation réalisés selon le scénario considéré. Le montant des capitaux échoués à la période  $t$  est calculé comme la différence entre les stocks de capital du scénario de transition écologique/changement climatique, noté  $TE/CC$ , et du scénario de référence, noté  $BAU$  :

$$CE_{i,j,t} = K_{i,j,t}^{TE/CC} - K_{i,j,t}^{BAU}$$

Le stock de capital échoué, sur une période  $[[t_0; T]]$ , peut être ensuite calculé en agrégeant sur l'ensemble des actifs et des secteurs, en tenant compte, dans certains cas, d'un taux d'actualisation constant :

$$SCE_t = \sum_{t=t_0}^T \sum_i \sum_j \frac{CE_{i,j,t}}{(1+r)^t}$$

## 2. Méthode des flux de trésorerie actualisés

**Une deuxième approche, davantage mobilisée dans la littérature, vise à utiliser le modèle des flux de trésorerie actualisés, dont les chroniques nécessaires pour le calibrer proviennent de modèles technicoéconomiques et/ou macroéconomiques.**

Pour chacun des scénarios, actifs et/ou secteurs considérés, la valeur du stock de capital, à une période  $t_0$  est calculé comme la somme actualisée des revenus générés,  $Y_{i,j,t}^S$  au cours de sa durée d'utilisation  $T_{i,j}^S$  :

$$K_{i,j,t_0}^S = \sum_{t=t_0}^{T_{i,j}^S} \frac{Y_{i,j,t}^S}{\prod_{k=t_0}^t (1+r_k^S)}$$

<sup>1</sup> Par exemple, une interdiction des chaudières au fioul à une date donnée devrait se traduire par une hausse du taux de dépréciation pour que leur valeur soit nulle à cette date.

Dans la grande majorité des articles, le taux d'actualisation  $r_t^S$  est supposé constant et indépendant du scénario, soit  $r_t^S = r$ , de sorte que le coût des capitaux échoués ne dépend que des chroniques des revenus générés et de durées d'utilisation différentes. Les revenus peuvent être calculés à l'aide de deux méthodes, selon que l'on se place dans une approche financière ou économique. Dans le premier cas, ces revenus sont assimilés aux dividendes que le capital/actif peut générer et le modèle se confond avec le modèle de Gordon et Shapiro. La valeur d'un actif est alors égale à la somme de tous les dividendes actualisés futurs, qui sont supposés croître au rythme du taux de croissance du PIB,  $g^S$ , dans sa version la plus simple (et généralement utilisée). La durée d'utilisation tend vers l'infini et en notant  $D_{i,j,t_0}$  le montant du dividende initial, indépendant du scénario, on a :

$$K_{i,j,t_0}^S = D_{i,j,t_0} \sum_{t=t_0}^{\infty} \left( \frac{1 + g^S}{1 + r} \right)^t$$

La seconde approche, économique, consiste à calculer les profits, comme la différence entre les recettes et les coûts de production, diminuée des investissements. Elle est appliquée à des secteurs produisant majoritairement un bien unique, tels que l'extraction d'énergies fossiles, pour lesquels il est possible d'isoler les flux de revenus générés par les capitaux/actifs associés. On a alors :

$$K_{i,j,t_0}^S = \sum_{t=t_0}^{T_{i,j}^S} \frac{(P_{i,j,t}^S - MC_{i,j,t}^S) Q_{i,j,t}^S - I_{i,j,t}^S}{(1 + r)^t}$$

Où  $P_{i,j,t}^S$  désigne le prix du bien,  $MC_{i,j,t}^S$  le coût marginal de production,  $Q_{i,j,t}^S$  les quantités et  $I_{i,j,t}^S$  les investissements.

Dans les deux approches, les différentes variables d'intérêt (taux de croissance du PIB, production, coûts de production, investissement, etc.) proviennent des scénarios construits par les organismes internationaux (par exemple l'AIE pour la production énergétique ou le NGFS pour les variables macroéconomiques). Les calculs peuvent également faire intervenir des modèles technicoéconomiques sectoriels (pour l'énergie, les transports) et/ou macroéconomiques (modèles d'équilibre général calculable, d'évaluation intégrés ou macroéconométriques<sup>1</sup>).

<sup>1</sup> Pour une présentation détaillée de ces catégories de modèles, 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, document de travail n° 2022/2, septembre.

Comme pour la première approche, la valeur du montant de capital échoué est égale à la différence entre les stocks de capital des deux scénarios :

$$CE_{i,j,t} = K_{i,j,t}^{TE/CC} - K_{i,j,t}^{BAU}$$

La totalité des travaux présentés ci-dessous porte quasi exclusivement sur le secteur d'extraction d'énergies fossiles (charbon, pétrole et gaz).

### 3. Méthode des tableaux d'entrées-sorties

**Une troisième approche s'appuie sur les relations intersectorielles et interrégionales pour estimer les effets de propagation le long des chaînes de valeur mondiales.**

Cahen-Fourot *et al.* (2021)<sup>1</sup> évaluent l'exposition des systèmes économiques au risque d'échouage du capital physique suite à une réduction de la production et de l'utilisation des combustibles fossiles. Les tableaux d'entrées-sorties du World Input-Output Database (WIOD - Timmer *et al.*, 2015<sup>2</sup>) détaillant les relations entre 56 secteurs productifs (niveau NACE rev. 2) de 43 pays permettent, par la méthode de la matrice inverse de Leontief, de calculer l'effet d'une réduction de la quantité utilisée d'intrants du secteur du minage et d'extraction des énergies fossiles sur la production de chaque secteur. De manière similaire à la seconde approche, celle-ci relève donc plus de l'exposition des secteurs d'activité que d'une estimation d'un stock de capital échoué. Des coefficients d'intensité capitalistique constants sont ensuite calculés à partir des données de stocks sectoriels de capital renseignés dans le WIOD. En appliquant ces coefficients aux effets marginaux précédents, des « multiplicateurs marginaux d'échouage » sont obtenus, c'est-à-dire l'effet d'une réduction de la quantité utilisée d'intrants du secteur du minage et d'extraction des énergies fossiles sur le stock de capital échoué. Ce chiffrage est toutefois réalisé en équilibre partiel : il ne tient compte ni des possibles ajustements des coefficients d'intensité capitalistique induits par l'obsolescence accélérée, ni des effets de substitution entre type d'énergie et intersectoriels, lesquels pourraient minimiser les résultats. Les auteurs classent ensuite les pays selon différents types d'échouage du capital.

---

<sup>1</sup> Cahen-Fourot L., Campiglio E., Godin A., Kemp-Benedict E. et Trsek S. (2021), « [Capital stranding cascades: The impact of decarbonisation on productive asset utilization](#) », AFD Research Papers, n° 204, mars.

<sup>2</sup> Timmer M. P., Dietzenbacher DE., Los B., Stehrer R. et de Vries G. J. (2015), « [An illustrated user guide to the World Input-Output Database: The case of global automotive production](#) », *Review of International Economics*, vol. 23(3), août, p. 575-605.



## CHAPITRE 3

# ESTIMATIONS DU MONTANT DE CAPITAL PHYSIQUE ÉCHOUÉ

---

Le tableau 1 page suivante propose une synthèse des principales estimations du montant de capital échoué, majoritairement pour le seul secteur de l'extraction d'énergies fossiles (charbon, pétrole et gaz), sur la base des deux premières méthodes décrites dans le chapitre précédent. Les résultats peuvent fortement varier d'un article à l'autre :

- Selon que les calculs 1) sont restreints au seul stock de capital actuellement utilisé dont une partie ne pourra pas être récupéré ou 2) intègrent les pertes de revenus d'investissements futurs qui auraient été réalisés en l'absence de transition écologique, réduisant la valeur présente du stock de capital (Baron et Fisher, 2015<sup>1</sup>).
- En fonction des trajectoires supposées de prix des capitaux : plus le différentiel de prix entre le scénario de référence et le scénario de transition écologique est important, plus les montants de capital échoué sont élevés.
- En fonction du scénario de référence, qui peut 1) être un sentier de croissance équilibré ne tenant pas compte de la transition écologique ou 2) intégrer des mesures de transition écologique jusqu'à une date donnée (mais ne permettant pas d'atteindre la neutralité carbone).

Pour l'Union européenne, qui est le niveau géographique le plus fin pour lequel des estimations sont disponibles, le montant annuel de capital échoué pourrait être de 1 point de PIB dans le cas d'une transition ordonnée. Le risque porterait quasi entièrement sur le secteur résidentiel.

---

<sup>1</sup> Baron R. et Fischer D. (2015), « [Divestment and stranded assets in the low-carbon transition](#) », document de référence pour la 32<sup>e</sup> table ronde sur le développement durable le 28 octobre 2015, OCDE.

**Tableau 1 – Revue des principaux articles empiriques estimant le montant de capital échoué, dû aux risques de transition**

Article	Méthode utilisée	Zone géographique couverte	Type de capital considéré	Prise en compte des revenus des investissements non réalisés	Période couverte	Résultats (coût annuel moyen, en \$ 2019)
AIE (2014) <sup>a</sup>	Flux de revenus futurs	Monde	Extraction d'énergies fossiles	Non	2014-2035	15 Md\$/an
Nelson et al. (2014)	Flux de revenus futurs	Monde	Extraction d'énergies fossiles et production électrique	Oui	2015-2035	1 500 Md\$/an
Lewis (2014)	Flux de revenus futurs	Monde	Extraction d'énergies fossiles	Oui	2013-2035	1 400 Md\$/an
Channel et al. (2015)	Flux de revenus futurs	Monde	Extraction d'énergies fossiles	Oui	2011-2050	2 500 Md\$/an
Dietz et al. (2016) <sup>b</sup>	Flux de revenus futurs	Monde	Extraction d'énergies fossiles	Oui	2015-2100	25-1 250 Md\$/an
Liquiti et Cogswell (2016) <sup>b</sup>	Flux de revenus futurs	Monde	Extraction d'énergies fossiles	Oui	2016-2041	2 300 Md\$/an
					2016-2115	2 500-6 600 Md\$/an
Irena (2017) <sup>c</sup>	Comptable et flux de revenus futurs	Monde	Total	Non	2015-2050	300-1 000 Md\$/an
			<i>Dont extraction d'énergies fossiles</i>			120-360 Md\$/an
		Union européenne	Total			150-310 Md\$/an
			<i>Dont extraction d'énergies fossiles</i>			~0 Md\$/an
Mercure et al. (2018) <sup>d</sup>	Flux de revenus futurs	Monde	Extraction d'énergies fossiles	Oui	2016-2035	120-670 Md\$/an
Saygin et al. (2019) <sup>c</sup>	Comptable	Monde	Production d'électricité à partir d'énergies fossiles	Non	2016-2050	30-55 Md\$/an
		France				<<1 Md\$/an
Chewprecha et al. (2022)	Flux de revenus futurs	France	Extraction d'énergies fossiles	Oui	2016-2035	~3 Md\$/an
Hansen (2022) <sup>b</sup>	Flux de revenus futurs	Monde	Extraction d'énergies fossiles	Oui	2020-2040	290-2 580 Md\$/an
		Europe				6-50d\$/an

a) L'AIE ne détaille pas la méthode employée pour calculer le stock de capital échoué, en dehors du fait que l'étude repose sur le modèle technicoéconomique World Energy Model et qu'elle ne tient pas compte des revenus des investissements futurs qui n'ont pas encore été réalisés.

b) L'intervalle des résultats de montants de capital échoué résulte d'hypothèses différentes sur les prix et les quantités d'énergies fossiles produites.

c) La borne basse (respectivement haute) des montants de capital échoué correspond à un scénario de transition ordonnée (respectivement retardée à 2030 et précipitée).

d) L'intervalle des résultats s'explique par des scénarios de transition ordonnée différents.

Note : Les méthodes de calcul des articles diffèrent : les chiffreages originaux ont été réalisés en prix courants ou en prix constants, avec des années de base différentes. Les chiffres dans le tableau et ci-dessous, exprimés en dollars constants, ont été ajustés pour avoir 2019 comme année de référence, afin de faciliter les comparaisons.

Source : travaux des auteurs



## 1. Études multisectorielles

Irena (2017)<sup>1</sup> mobilise cette approche pour calculer le stock de capital échoué cumulé sur la période 2015-2050, pour 17 zones géographiques<sup>2</sup>, et pour quatre secteurs d'activité.

- **L'industrie**, où les capitaux échoués portent sur les biens d'équipement thermiques industriels, consommant des énergies fossiles. Le stock de capitaux échoués est estimé à partir d'une approche comptable (en fonction d'estimations de la durée théorique d'amortissement, du stock de capital et des dépenses d'investissement).
- **La construction**, qui couvre *a priori* l'ensemble des biens immobiliers (dont les bâtiments industriels). Le stock des actifs échoués est calculé à partir d'une approche comptable (en fonction d'estimations des taux de démolition, de la part des bâtiments consommant des énergies fossiles, des coûts de construction et des investissements).
- **Les activités d'extraction et de production d'énergies fossiles** (charbon, pétrole et gaz). L'estimation des actifs échoués est réalisée à partir d'une approche financière, sur la base de la valorisation des principales entreprises et d'estimations de leurs flux de trésorerie futurs estimés.
- **La production d'électricité à partir d'énergies fossiles** (charbon, pétrole, gaz). Le stock d'actifs échoués est estimé à partir d'une approche comptable (en fonction d'estimations de la durée d'amortissement, du stock de capital et des dépenses d'investissement).

Deux scénarios sont considérés, selon que la transition est réalisée de façon ordonnée ou que la transition est retardée à 2030 – avec, dans les deux cas, une neutralité carbone atteinte en 2050. Un scénario de référence est également construit, où ni la transition écologique ni le changement climatique ne sont pris en compte. Ces scénarios se différencient par les chroniques des variables d'intérêt listées ci-dessus pour chaque secteur (taux de dépréciation, investissements, etc.)

Au niveau mondial, sur la période 2015-2050, le montant annuel moyen de capitaux échoués est estimé autour de 300 milliards de dollars pour le scénario d'une transition ordonnée (resp. 1 000 milliards de dollars pour le scénario d'une transition retardée sur la période 2030-2050), réparti entre 150 milliards de dollars (resp. 510 milliards) pour la construction, 120 milliards de dollars (resp. 360 milliards) pour les activités d'extraction et de production d'énergie fossile,

---

<sup>1</sup> 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 Paper, juillet.

<sup>2</sup> Union européenne (28 pays), États-Unis, Japon, Chine, Russie, Canada, Arabie saoudite, Australie, Inde, Brésil, Corée du Sud, Turquie, Indonésie, Mexique, Argentine, Afrique du Sud et reste du monde.

30 milliards de dollars (resp. 100 milliards) pour la production d'électricité à partir d'énergies fossiles, et un montant négligeable (resp. 30 milliards de dollars) pour l'industrie.

Au niveau de l'Union européenne (28 pays), conditionnellement aux secteurs retenus dans l'étude, les capitaux échoués concernent quasi exclusivement la construction (99 %), pour un montant total annuel moyen estimé entre 150 et 310 milliards de dollars.

L'évaluation proposée par l'Irena est *a priori* la plus complète actuellement dans la littérature pour estimer les montants de capital échoué en raison de la transition écologique (mais à l'exclusion du risque climatique), en couvrant quatre secteurs. Elle n'est toutefois pas exhaustive, le secteur des transports (véhicules et infrastructures) n'étant par exemple pas couvert. De plus, le fait d'avoir recours à des méthodes d'évaluation différentes peut générer des problèmes de cohérence dans le chiffrage entre secteurs. Dans le cas de l'Union européenne, l'absence de capitaux échoués dans l'industrie et la production électrique peut questionner (aucune explication n'étant fournie).

Le Stockholm Environment Institute (2018) calcule le stock de capital exposé au risque d'obsolescence accélérée, pour les secteurs automobile, textile et de production électrique, pour l'Union européenne (28 pays), à l'horizon 2025. Pour chacun des trois secteurs, une approche *bottom-up* est utilisée avec une identification préalable des principaux actifs exposés, sur la base de laquelle les calculs sont réalisés avec des données comptables et de marché des principales entreprises, et d'hypothèses de prévisions sectorielles et macroéconomiques :

- dans **l'industrie automobile**, le risque porte sur les actifs immobiliers (usines, concessionnaire, etc.), les locations avec option d'achat (*leasing*), les actifs incorporels (brevets, recherche et développement, marque). En 2025, entre 115 et 290 milliards de dollars des actifs seraient exposés ;
- dans **l'industrie textile**, les actifs exposés sont principalement les actifs immobiliers (magasins) et les actifs incorporels (marques). Les auteurs ne donnent pas de chiffrage pour ce secteur du fait de l'incertitude, mais considère qu'une part significative des 400 milliards de dollars de valorisation des entreprises en 2016 de ce secteur est potentiellement exposé ;
- dans **la production électrique**, les actifs exposés sont les actifs corporels (centrales et équipements) et incorporels (*goodwill*), pour un montant compris entre 350 et 600 milliards de dollars en 2025.

## 2. Industries extractives d'énergies fossiles (pétrole, gaz et charbon)

La très grande majorité des études identifiées porte sur le secteur des industries extractives d'énergies fossiles, dans la mesure où il est le plus immédiatement exposé aux risques de transition. Les estimations des montants de capital échoué ont quasiment toutes été réalisées à l'aide de la deuxième méthode des flux de trésorerie actualisés. Les données nécessaires pour calibrer la maquette financière sous-jacente (projections de prix, de production et d'investissement en énergies fossiles) ont été obtenues à partir 1) de modèles macroéconomiques (Dietz *et al.*, 2016<sup>1</sup>), éventuellement couplés avec des modèles technicoéconomiques sectoriels (Mercure *et al.*, 2018<sup>2</sup>), 2) de modèles technicoéconomiques seuls (Nelson *et al.*, 2014<sup>3</sup>), ou 3) des hypothèses du World Energy Outlook de l'AIE (Lewis, 2014 ; Linquiti et Cogswell, 2016 ; Hansen, 2022<sup>4</sup>) ou de travaux similaires (Channell *et al.*, 2015<sup>5</sup>) directement. Ces estimations sont pour la plupart réalisées sur une période allant jusqu'en 2035-2040 pour l'ensemble du monde.

Les résultats obtenus à partir de modèles font état d'un montant annuel moyen de capital échoué compris entre 0 et 1,7 point de PIB. Les travaux directement réalisés à partir des chiffrages de l'AIE ou assimilés donnent un intervalle plus large, de l'ordre de 0,3 point à 7,5 points de PIB de capital échoué chaque année. Ces derniers chiffres doivent être interprétés avec prudence dans la mesure où ils sont calculés en équilibre partiel, sans tenir compte d'un certain nombre d'effet de bouclage. Dans tous les cas, l'exposition directe à ce risque des pays de l'Union européenne, en tant qu'importateurs nets d'énergies fossiles, est quasiment nulle.

---

<sup>1</sup> Dietz S., Bowen A., Dixon C. et Gradwell P. (2016), « Climate value at risk of global financial assets », *Nature Climate Change*, vol. 6, avril, p. 676-679.

<sup>2</sup> Mercure J. F., Pollitt H., Viñuales J. E., Edwards N. R., Holden P. B., Chewpreecha U., Salas P., Sognaes I., Lam A. et Knobloch F. (2018), « Macroeconomic impact of stranded fossil fuel assets », *Nature Climate Change*, vol. 8, juin, p. 588-593.

<sup>3</sup> Nelson D., Hervé-Mignucci M., Goggins A., Szambelan S. J., Vladeck T. et Zuckerman J. (2014), *Moving to a Low-Carbon Economy: The Impact of Policy Pathways on Fossil Fuel Asset Values*, Climate Policy Initiative, coll. « CPI Energy Transition Series ».

<sup>4</sup> Lewis M. (2014), « [Stranded assets, fossilised revenues](#) », Kepler Cheuvreux, avril ; Linquiti P. et Cogswell N. (2016), « [The Carbon Ask: Effects of climate policy on the value of fossil fuel resources and the implications for technological innovation](#) », *Journal of Environmental Studies and Sciences*, vol. 6, mai, p. 662-676 ; Hansen T. A. (2022), « [Stranded assets and reduced profits: Analyzing the economic underpinnings of the fossil fuel industry's resistance to climate stabilization](#) », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 158, avril.

<sup>5</sup> Channell J., Curmi E., Nguyen P., Prior E., Syme A. R., Jansen H. R., Rahbari E., Morse E. L., Kleinman S. M. et Kruger T. (2015), *Energy Darwinism II: Why a Low Carbon Future Doesn't Have to Cost the Earth*, Citigroup, août.

Sur la base de la troisième méthode, Cahen-Fourot *et al.* (2021)<sup>1</sup> calculent l'effet d'une réduction de la quantité utilisée d'intrants du secteur du minage et d'extraction des énergies fossiles sur le stock de capital physique total. Dans le cas de la France :

- une réduction d'1 \$ des intrants du secteur fossile mondial échoue 5,90 \$ de capital physique français (sixième rang mondial pour l'échouage total) ;
- une réduction d'1 \$ des intrants du secteur fossile français échoue 2,50 \$ de capital physique mondial (premier rang mondial pour l'échouage externe) ;
- une réduction d'1 \$ des intrants du secteur fossile des 42 autres pays échoue 1,80 \$ de capital physique français (douzième rang mondial pour l'exposition externe).

Quelques limites peuvent être mises en avant. Plusieurs pays extracteurs d'énergie fossiles ne sont pas dans les données (les pays de l'OPEP et l'Afrique du Sud, par exemples), ce qui tend à surestimer le poids des pays considérés dans les secteurs des combustibles fossiles. Le niveau de nomenclature NACE rev. 2 ne permet pas une séparation fine des types de capitaux (machines vs logements). De plus, l'hypothèse de linéarité entre production et stock de capital impliquée par l'utilisation de coefficients sectoriels d'intensité capitalistique omet de possibles effets d'échelle. Enfin, dans l'intérêt d'une étude d'impact macroéconomique nationale, les effets domestiques ne sont pas détaillés, c'est-à-dire l'effet de la réduction d'un dollar des intrants du secteur fossile français sur le stock de capital physique français.

En outre, sur la base d'un chiffrage de montants de capital échoué réalisé à l'aide de modèles macroéconomique et technicoéconomiques sectoriels, Semieniuk *et al.* (2022) en calculent la répartition par pays, selon deux classifications : en cinq grandes catégories d'agents nationaux (administrations publiques, ménages, investisseurs, banques et autres indéterminés) et en sept catégories d'agents financiers (fonds administrés, créanciers, banques, assurance, *private equity*, pensions auto-gérées, autres). Les calculs s'appuient également sur une base de données cartographiant géographiquement les entreprises productrices de pétrole et de gaz et de leur structure de capital. Dans le cas de la France, le coût annuel moyen est estimé à environ 3 milliards de dollars (à la différence du premier article, les effets indirects sont capturés) sur la période 2016-2035. Selon la première classification, la quasi-totalité de ce coût porte sur la catégorie d'agent « autres indéterminés », tandis qu'avec la seconde, le coût est supporté pour plus de la moitié par des fonds administrés, et pour un autre quart par les banques.

---

<sup>1</sup> Cahen-Fourot L., Campiglio E., Godin A., Kemp-Benedict E. et Trsek S. (2021), « [Capital stranding cascades: The impact of decarbonisation on productive asset utilization](#) », AFD Research Papers, n° 204, mars.

### 3. Éléments comparatifs sur l'ampleur des actifs exposés au risque d'obsolescence accéléré entre la France et l'Allemagne

Cette section propose des éléments permettant d'apprécier le montant d'actifs potentiellement exposés au risque d'obsolescence accélérée en France et en Allemagne. Une approche *bottom-up*, reposant sur une identification préalable des secteurs et des actifs exposés à partir de laquelle les calculs sont réalisés grâce à des données relatives aux volumes et aux prix, est utilisée. Les secteurs couverts sont l'immobilier résidentiel, les transports et la production électrique. Il s'agit *a priori* des secteurs les plus exposés au risque de capital échoué pour ces deux pays (Irena, 2017<sup>1</sup>). D'autres secteurs pourraient également être concernés, tels que l'agriculture, l'industrie de production automobile ou le réseau gazier, pour lesquels cependant les données sont insuffisantes pour apprécier le risque ou le choc sera d'ampleur moindre. En outre, les données présentées ne sont pas nécessairement comparables entre les deux pays, du fait de l'absence de normes et règles comptables communes (notamment pour le logement).

Pour la France, dans le secteur immobilier résidentiel, 14 % des logements sont considérés comme très énergivores<sup>2</sup> (étiquettes F et G du diagnostic de performance énergétique - DPE) et font l'objet d'une interdiction à la location progressive de 2023 à 2028, en l'absence de rénovation énergétique. S'ajoutent également les logements E, représentant 18 % du parc immobilier résidentiel, qui seront concernés par cette interdiction à la location à partir de 2034. En outre, 50 % des logements sont équipés de chaudières au fioul ou au gaz, dont l'installation de nouvelles est progressivement interdite depuis 2022<sup>3</sup>. Le coût total des investissements bruts des rénovations des seuls logements E, F et G pour les rendre décents selon la loi Climat et résilience serait estimé à 240 milliards d'euros<sup>4</sup>, lequel peut par ailleurs être assimilé au

---

<sup>1</sup> L'Irena souligne le risque de capital échoué pour le secteur des transports, sans pour autant proposer de chiffrage.

<sup>2</sup> Source : Observatoire national de la rénovation énergétique (ONRE).

<sup>3</sup> Le gouvernement a fixé un objectif de sortie des chaudières au fioul d'ici 2028 et une concertation devrait être lancée sur le non-renouvellement des chaudières gaz dans le bâtiment existant.

<sup>4</sup> Le montant est calculé sur la base d'une analyse statique, à partir du nombre de logements dont l'étiquette est E, F ou G, au 1<sup>er</sup> janvier 2022 selon l'ONRE multiplié par les coûts de rénovation moyens estimés en 2018 par le Cired. Ces coûts sont notamment ceux retenus dans Criqui P. (2022), *Les coûts d'abattement. Partie 5 – Logement*, rapport de la commission sur les coûts d'abattement, France Stratégie, novembre. Il est ici fait l'hypothèse que les rénovations sont performantes au sens de la loi Climat et résilience. Les logements F et G (respectivement E) sont rénovés pour atteindre l'étiquette C (respectivement B), le coût étant différencié en fonction de l'étiquette initiale. Le calcul ne tient notamment pas compte du fait qu'une partie supplémentaire des logements sera déclassée vers les étiquettes E, F et G par vétusté, ce qui impliquera des investissements supplémentaires pour maintenir ou améliorer l'efficacité énergétique de ces logements. Les calculs ont été réalisés par la Direction générale du Trésor.

montant de capital échoué sous une hypothèse de non-arbitrage. En effet, le coût de l'investissement peut être assimilé à la perte de valeur des logements tant qu'ils ne sont pas rénovés. Ce coût ne tient pas compte des éventuels investissements de rénovation pour les étiquettes DPE supérieures, et pour les autres catégories de bâtiments (notamment dans le tertiaire), ni des coûts échoués liés à un possible décommissionnement anticipé des réseaux de distribution de gaz<sup>1</sup>. Par ailleurs, il s'agit d'une borne haute : une partie des investissements sera entreprise indépendamment des mesures d'incitation et d'accompagnement mises en place, minimisant le montant de capital échoué dans le secteur du logement. En matière de production d'électricité, environ 7 % provient d'énergies fossiles (charbon, pétrole ou gaz naturel)<sup>2</sup>. Saygin *et al.* (2019), qui cherchent à évaluer le montant de capital échoué dans la production électrique, estiment le risque quasiment nul pour la France, que la transition soit ordonnée ou retardée et précipitée. Enfin, dans le secteur des transports, 37,3 millions de véhicules thermiques, fonctionnant à l'essence ou au diesel, sont répertoriés sur un total de 38,2 millions de véhicules et sont potentiellement exposés à une perte de valeur provoquée par les risques de transition.

Pour l'Allemagne, dans le secteur immobilier résidentiel, la première réglementation thermique est entrée en vigueur en 1977, de sorte que 68 % des logements qui constituent le parc actuel ont été construits sans respect du moindre critère de performance énergétique<sup>3</sup>. En particulier, les trois quarts de la consommation de chauffage pour les logements proviennent du gaz naturel et du fioul<sup>4</sup>. En outre, les mesures prises avant 2020, ainsi que les plans d'urgence de rénovation mis en place en 2021 et 2022, n'ont pas permis d'atteindre jusqu'à présent les objectifs de réduction d'émissions carbone assignés à ce secteur par la loi allemande de protection sur le climat (adoptée en 2021). Dans le secteur de la production d'électricité, sur les plus de 200 centrales électriques répertoriées sur le territoire allemand, environ 55 % utilisent des énergies fossiles (charbon, pétrole ou gaz naturel)<sup>5</sup>. La production d'électricité à partir de ces énergies fossiles représente par ailleurs 45 % de la production totale<sup>6</sup>. Saygin *et al.* (2019) calculent que le montant annuel moyen de capital échoué dans le secteur de la production électrique pourrait atteindre jusqu'à 2 milliards de dollars par an dans le cas d'une transition retardée et précipitée à partir de 2030. Enfin, dans le secteur des transports, de manière analogue la France, 45,8 millions de véhicules thermiques, fonctionnant à l'essence ou au diesel, sont répertoriés sur un total de 48,5 millions de véhicules.

---

<sup>1</sup> Une partie du réseau de distribution de gaz dont la durée d'amortissement est comprise entre trente et quarante-cinq ans est susceptible de ne plus être utilisé du fait de la sortie progressive du gaz pour le chauffage résidentiel et tertiaire.

<sup>2</sup> Source : RTE.

<sup>3</sup> Statistisches Bundesamt – OFATE.

<sup>4</sup> Source : BDEW – association allemande des industries énergétiques et hydrauliques.

<sup>5</sup> Source : Umweltbundesamt – Bureau fédéral pour l'environnement.

<sup>6</sup> Source : Agora Energiewende – institut de recherche sur le suivi des politiques climatiques et énergétiques.



## CHAPITRE 4

# ACTIFS FINANCIERS EXPOSÉS AU RISQUE DE TRANSITION

---

Les capitaux échoués dans les secteurs productifs et dans le patrimoine des ménages risquent de se traduire par une dépréciation significative des actifs financiers sous-jacents. En outre, les travaux académiques ont d'abord porté sur la matérialisation du risque d'échouage dans la sphère financière, à la suite de l'hypothèse de bulle carbone formulée par Carbone Tracker Initiative (Campanale *et al.*, 2011), selon laquelle une part significative du stock d'énergies fossiles valorisé ne sera effectivement pas exploitée du fait des politiques d'atténuation, pouvant conduire à une très forte dépréciation des actifs des entreprises concernées. La transmission possible de ce risque au secteur financier a par la suite été développée par l'ancien gouverneur de la banque d'Angleterre, Mark Carney<sup>1</sup> (Carney, 2015).

### 1. Impacts de la transition écologique sur la situation financière des agents institutionnels

Au niveau mondial, toutes les catégories d'agents institutionnels peuvent *a priori* être exposées au risque d'actifs financiers échoués :

- la mise en place de politiques climatiques pourrait ainsi altérer le modèle d'affaires de certaines entreprises, avec un rehaussement significatif des seuils de rentabilité ;
- un renchérissement de l'énergie carboné pourrait dégrader les capacités financières de certains ménages en plus d'impliquer la dévalorisation de certains de leurs actifs (résidences ne répondant plus aux normes d'efficacité énergétique, véhicules thermiques, etc.) (Muldoon-Smith et Greenhalgh, 2019) ;

---

<sup>1</sup> Dans son discours, Mark Carney distingue les risques de transition des risques physiques. Seul le risque de transition est ici considéré, les risques physiques sont développés dans le rapport thématique [Dommages et adaptation](#). Il est important de noter que les deux types de risques sont liés : plus la transition (et donc éventuellement les risques de transition associés) sera retardée, plus grands seront les risques physiques.

- enfin, les administrations publiques dont les ressources financières proviennent en large partie de l'exploitation de ressources fossiles pourraient voir leur capacité financière amputée et leurs capacités d'emprunts sur les marchés de capitaux réduites (Manley *et al.*, 2017) ;
- les secteurs bancaires et financiers pourraient voir la valeur de leur portefeuille significativement diminuer, du fait des risques portant sur les ménages, les entreprises et les administrations publiques, conduisant à des contraintes importantes sur le financement de l'économie.

## 2. Canaux de transmission et tentatives de chiffrage du risque d'échouage d'actifs financiers

Une importante littérature s'est récemment intéressée aux possibles canaux de transmission à la sphère financière, dans le but d'estimer l'ampleur du choc pour pouvoir ensuite les minimiser en amont ou de s'en prémunir. Une trop grande déstabilisation du secteur financier (augmentation de la volatilité, des probabilités de défaut, etc.) peut en effet ralentir, voire momentanément arrêter le processus de décarbonation de nos économies (Geels, 2013).

Ces liens entre actifs échoués et impacts sur la stabilité financière restent cependant encore un domaine de recherche ouvert et les études ne convergent pas sur l'ampleur ou même la nature du risque<sup>1</sup>. Toutes néanmoins pointent que le risque serait plus important dans le cas d'une transition désordonnée ou retardée et précipitée. Il importe donc d'isoler les phénomènes et les mécanismes propres aux secteurs financiers que pourrait recouvrir la matérialisation de ce risque.

Le premier point tient au fait que, dans ce secteur plus encore que dans d'autres, les anticipations de revenus futurs associés aux titres jouent un rôle primordial dans la stabilité des marchés. Aussi de brusques modifications simultanées des anticipations collectives pourraient-elles être à même de conduire en retour à des réévaluations brutales de catégories entières d'actifs, voire de les rendre partiellement illiquides. À l'extrême, la matérialisation de ce risque pourrait conduire au gel de certains marchés, voire à des mécanismes de *bank run* dans le cas où le secteur bancaire venait à être touché. Les canaux par lesquels pourraient passer ces brusques modifications sont aujourd'hui anticipées :

- évolution de la crédibilité accordée aux annonces de mise en place politiques de lutte contre le changement climatique contraignantes ;
- introductions soudaines de politiques climatiques contraignantes non ou mal anticipées ;

---

<sup>1</sup> Dans les scénarios les plus adverses, les différents auteurs, à la suite de Carney (2015), évoquent la possibilité du « Climate-Minsky Moment ».



- et accélération dans la mise en place des politiques climatiques par rapport au rythme anticipé par les marchés.

On peut par ailleurs noter que ce risque peut émaner de la sphère financière pour ensuite se diffuser à l'économie productive : un désengagement des investisseurs des actifs bruns plus rapide que la décarbonation réelle de l'économie pourrait ainsi entraîner l'échouage d'actifs dans un phénomène autoréalisateur, sans que ce ne soit justifié par la réalité de la transition (Ivanov *et al.*, 2020 et TCFD, 2017).

Au-delà de ces risques de « premier tour », le second risque propre à la sphère financière tient à l'importance des effets de réseau dus à l'intrication des investissements et aux potentiels effets de cascade que des défauts, initialement localisés, peuvent déclencher. L'échouage circonscrit de quelques acteurs facilement identifiables et très exposés à la transition (comme l'industrie pétrolière) pourrait être à la source d'effet de contagion, faisant ainsi se déplacer les risques vers des acteurs *a priori* moins vulnérables<sup>1</sup> (Battiston *et al.*, 2017<sup>2</sup>).

À l'inverse, certains outils et stratégies, eux aussi propres au secteur financier, pourraient permettre à celui-ci d'être plus résilient face aux risques de transition que le secteur productif. Il s'agit par exemple des stratégies de diversification vers des investissements « verts » (Dunz *et al.*, 2021<sup>3</sup>) ou bien encore de l'utilisation de produits de couverture ou assuranciers prenant spécifiquement en compte le risque de transition. En outre, plusieurs auteurs ont noté que la littérature sur le risque de transition au sein du secteur financier, encore émergente sur le sujet, n'a souvent considéré que les risques de dévalorisation et qu'elle a, à l'inverse, minimisé les opportunités d'investissements que pourrait offrir la transition et qui en retour pourraient minimiser les risques (Monasterolo, 2020<sup>4</sup>). En particulier, beaucoup d'études se concentrent sur le court terme et tendent ainsi à négliger les évolutions technologiques de long terme qui pourraient constituer des opportunités de placement (Cahen-Fourot *et al.*, 2021).

Si les canaux de transmission théoriques sont identifiés de manière encore balbutiante par la littérature académique et institutionnelle, les tentatives de chiffrage précis de ces risques sont, eux, avancés avec encore plus de précaution par les auteurs du fait de la grande incertitude qui les accompagne. Ces tentatives de quantification font en effet face à un

---

<sup>1</sup> On peut noter que ces effets de réseau sont également à prendre en compte dans la propagation du risque au sein de la sphère productive. Voir Cahen-Fourot L., Campiglio E., Godin A., Kemp-Benedict E. et Trsek S. (2021), « [Capital stranding cascades: The impact of decarbonisation on productive asset utilization](#) », AFD Research Papers, n° 204, mars.

<sup>2</sup> Battiston S., Mandel A., Monasterolo I., Schütze F. et Visentin G. (2017), « A climate stress-test of the financial system », *Nature Climate Change*, vol. 7, mars, p. 283-288.

<sup>3</sup> Dunz N., Naqvi A. et Monasterolo I. (2021), « Climate sentiments, transition risk, and financial stability in a stock-flow consistent model », *Journal of Financial Stability*, vol. 54(C).

<sup>4</sup> Monasterolo I. (2020), « Climate Change and the Financial System », *Annual Review of Resource Economics*, vol. 12, octobre, p. 299-320.

certain nombre d'écueils, parfois difficilement surmontables, le principal d'entre eux étant l'identification des secteurs potentiellement exposés. En effet, en plus de l'incertitude qui entoure les scénarios de transition, la granularité des classifications d'activité aujourd'hui disponibles n'est souvent pas adéquate pour pouvoir créer un isolat d'activités carbonés (et d'actifs correspondants, dans le cas du secteur financier) (Battiston *et al.*, 2017), et des différences parfois importantes existent d'un secteur à l'autre ou d'un pays à l'autre (Jacquetin, 2021<sup>1</sup>). Ces difficultés expliquent les écarts parfois importants qui peuvent exister d'une estimation à l'autre, certaines représentant plusieurs fois les montants de dévalorisations d'actifs engendrées par la crise de 2008 (Daumas, 2023<sup>2</sup>). En outre, Battiston *et al.* (2017) évaluent le stock d'actifs exposés autour de 27 000 milliards de dollars en 2015, pour les pays de l'Union européenne et pour les États-Unis. La banque d'Angleterre (2015)<sup>3</sup> estime, au niveau mondial, le stock d'actifs exposés au risque de transition autour de 75 000 milliards de dollars, dont 9 000 milliards pour les secteurs d'extraction d'énergies fossiles (charbon, pétrole et gaz), et 13 000 milliards pour les industries énérgo-intensives.

Les autorités prudentielles et de supervision du secteur financier se sont, depuis maintenant une décennie, saisies de la question, via notamment l'obligation de divulgation (*disclosure*) qui est faite aux différents acteurs du secteur. De plus, les risques de transition ont désormais été intégrés au sein de *stress-tests* dédiés à la question. S'il n'existe à ce jour aucune méthode standardisée pour la conduite de ces nouveaux *stress-tests* climatiques, on peut néanmoins ici citer le canevas général donné par le *Network for Greening the Financial System* (NGFS), un consortium de banques centrales et d'autorités de régulation dédié à ces questions. Leur méthodologie s'appuie sur le couplage de différents types de modèles (technicoéconomiques, sectoriels et climatiques, ainsi que macroéconomiques) et distingue, pour le risque de transition, un scénario « ordonné », dans lequel les politiques climatiques sont mises en place de façon graduelle et dans lequel les technologies sont disponibles sans contrainte, d'un scénario « désordonné », dans lequel la mise en place des politiques climatiques est repoussée jusqu'à 2030 et fait face à différentes contraintes sectorielles et internationales. Un module proprement financier permet ensuite de passer de ces scénarios analysés à l'aide d'un modèle macroéconomique à une estimation des probabilités de défaut des entreprises non financières (NGFS, 2020<sup>4</sup>).

---

<sup>1</sup> Jacquetin F. (2021), « [Stress-tests climatiques par scénarios. De l'analyse de risques à la modélisation](#) », Ademe, document de travail, février.

<sup>2</sup> Daumas L. (2023), « [Financial stability, stranded assets and the low carbon transition - A critical review of the theoretical and applied literatures](#) », *Journal of Economic Surveys*, mars.

<sup>3</sup> Banque d'Angleterre (2015), [The Impact of Climate Change on the UK Sector: A Climate Change Adaptation Report by the Prudential Regulation Authority](#), septembre.

<sup>4</sup> NGFS (2020), « [Guide to climate scenario analysis for central banks and supervisors](#) », Network for Greening the Financial System, juin.

L'ACPR (Allen *et al.*, 2020<sup>1</sup>) a ainsi mené un exercice d'évaluation du degré d'exposition des système bancaire et d'assurance français aux risques de transition et physiques liés au changement climatique. L'exercice est réalisé avec les établissements français sur la base du volontariat. Deux scénarios ont été construits, selon que la transition écologique est retardée à 2030 ou ordonnée, à partir de 2025 et réalisée sur environ dix ans. Le scénario de transition ordonnée est utilisé comme référence. Le cadre macroéconomique communiqué aux établissements bancaires et d'assurance pour réaliser l'exercice s'appuie sur les travaux du NGFS. Sur la base de ces données macrofinancières qui portent sur la période 2025-2050, les établissements bancaires et d'assurance calculent des projections de leur bilan et les risques escomptés. Les résultats sont ensuite agrégés par l'ACPR (ACPR, 2021<sup>2</sup>). Des itérations, ainsi que des tests de robustesse, ont également été réalisés pour affiner les résultats. Il en ressort notamment que les secteurs de la construction, de l'immobilier, de la production électrique et du commerce sont les plus exposés au risque de transition : pour les établissements bancaires, la part des crédits à risque dans ces secteurs est estimée entre 5 % et 6 % à l'horizon 2050.

---

<sup>1</sup> Allen T., Dees S., Boissinot J., Caicedo C. M., Chouard V., Clerc L., De Gaye A., Devulder A., Diot S., Lisack N., Pegoraro F., Rabaté M., Svartzman R. et Vernet L. (2020), « [Climate-related scenarios for financial stability assessment: An application to France](#) », Banque de France, Working Paper, n° 774, juillet.

<sup>2</sup> ACPR (2021), « [A first assessment of financial risks stemming from climate change: The main results of the 2020 climate pilot exercise](#) », Banque de France, *Analyses et synthèses*, n° 122-2021, avril.





## CHAPITRE 5

# ÉVALUATIONS *EX ANTE* DE L'IMPACT MACROÉCONOMIQUE D'UNE OBSOLESCENCE ACCÉLÉRÉE D'UNE PARTIE DU STOCK DE CAPITAL

---

### 1. Revue des mécanismes de transmission au niveau macroéconomique

L'impact macroéconomique d'une obsolescence accélérée du stock de capital devrait être négatif sur l'activité et l'emploi, à travers cinq canaux de transmission : l'augmentation du coût du capital, un effet d'éviction lié à une réorientation des investissements, le risque financier, une baisse temporaire de la productivité du capital et le risque de propagation dans la chaîne de valeur.

En théorie, à taux d'intérêt inchangé, le risque de capital échoué pourrait se traduire par une hausse du taux de dépréciation pour les entreprises et secteurs concernés, laquelle augmente mécaniquement le coût du capital associé, défini selon la formule de Hall-Jorgenson<sup>1</sup>. Un coût du capital plus important a pour conséquence de réduire la rentabilité attendue des projets d'investissement. Ainsi, moins de projets passent avec succès le test de valeur actuelle nette positive<sup>2</sup>, de sorte que l'investissement diminue. Cet effet négatif sera néanmoins plus ou moins significatif au niveau macroéconomique, selon le degré d'exposition des entreprises et secteurs au risque d'actifs échoués.

---

<sup>1</sup> Selon cette formule, le coût du capital est égal à la somme du taux d'intérêt réel auquel l'entreprise peut emprunter pour financer son investissement et du taux de dépréciation, pondérée par le prix de l'investissement rapporté à celui de la production.

<sup>2</sup> Le test de la valeur actuelle nette consiste à comparer la somme des flux de revenus actualisés qu'un investissement générerait, à son coût. Si la valeur est positive, alors l'entreprise a intérêt à réaliser l'investissement.

Le besoin de remplacement du capital augmente. À l'état stationnaire, l'investissement est fonction croissante du taux de dépréciation. Maintenir le niveau de capital constant impliquerait donc d'augmenter les dépenses d'investissement à long terme. Par ailleurs, pour des niveaux élevés d'investissements, **un risque d'éviction avec les autres postes de dépenses existe** (consommation ou autres types d'investissement). C'est le cas des ménages, par exemple, pour la rénovation énergétique des logements ou l'achat d'une voiture bas-carbone. Ces investissements représentent pour eux un surcoût, susceptible de réduire leurs consommations courantes et leurs achats de biens durables. Ce raisonnement vaut aussi pour l'État, qui, devant investir davantage dans le remplacement d'une partie de son capital émissif et potentiellement mettre en place des mesures d'accompagnement pour les ménages et les entreprises, peut le faire au détriment d'autres dépenses.

L'échouage d'une partie du stock de capital diminue la valeur des actifs sous-jacents détenus par les agents, pouvant notamment contraindre les institutions financières à accroître leurs provisions, provoquant alors **une baisse du crédit, voire une augmentation du risque financier, et donc du coût de financement via la prime de risque**. Les ménages et les entreprises détenant des titres financiers liés aux secteurs carbonés seront également exposés via le risque de perte de valeur de leur portefeuille. Si le risque d'une bulle carbone, fondée sur des anticipations erronées quant à la rentabilité future du capital brun, se matérialise, l'ensemble des institutions financières, des entreprises et des ménages détenant des actions ou des obligations liées aux secteurs bruns pourraient essuyer des pertes importantes, susceptibles de mettre en danger la stabilité du système financier et de créer un choc macroéconomique majeur.

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 seconde (Ferrari et Pagliari, 2021<sup>1</sup>). 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.

Enfin, les secteurs dont les capitaux sont échoués vont **négativement toucher tous les secteurs** (risque de propagation du choc) via les interconnexions économiques et financières. C'est le cas en particulier des secteurs économiques dépendant directement des secteurs extractifs, dont ils utilisent les produits comme intrants.

---

<sup>1</sup> Ferrari M. et Pagliari M. S. (2021), « [No country is an island. International cooperation and climate change](#) », Banque de France, Working Paper n° 815, août.

## 2. Intégration du capital échoué dans les modèles macroéconomiques

**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)<sup>1</sup>, fondée sur l'utilisation du modèle ThreeME, propose ainsi d'introduire une chronique de capitaux échoués, calibrée à partir des estimations de l'Irena (2017)<sup>2</sup> pour la France. Dans cet exemple, seuls deux secteurs (l'immobilier résidentiel et l'immobilier tertiaire), sont supposés connaître une hausse de la dépréciation de leur capital entre 2030 et 2050, dans un scénario de transition retardée et précipitée, à partir de 2030. L'introduction d'actifs échoués vient modifier la dynamique du capital détenu par ces secteurs, dont l'accumulation est ralentie. L'impact macroéconomique se matérialise alors via les ménages, qui anticipent des pertes de capital et ajustent en conséquence à la hausse leur taux d'épargne. L'augmentation de la dépréciation produit sur eux un effet de richesse négatif et une incitation à investir dans la rénovation énergétique des logements. Le cadre de modélisation retenu garantit également une cohérence, dans le temps, entre stock de capital et flux d'investissements et de capitaux échoués. 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.

Une autre approche consiste à endogénéiser la dépréciation du capital induite par l'introduction d'une contrainte sur les émissions de GES. Dans un modèle-jouet en cours d'élaboration à l'Insee, de type Ramsey, à deux formes de capital (brun et vert), où seul le brun est émissif, il est fait l'hypothèse qu'un planificateur social choisit une trajectoire d'investissements et de capitaux échoués compatible avec une contrainte carbone donnée (comme un budget carbone ou une cible ponctuelle sur les flux d'émissions, de type « Fit for 55 » en 2030). Ici les contraintes sur les émissions sont fixées de manière exogène (dans une approche coût-efficacité) et jouent comme un prix du carbone, plus ou moins fort, en fonction de leur sévérité. Pour les satisfaire, le choix peut être fait à tout moment de jeter du capital

---

<sup>1</sup> Ademe, Seureco, Banque de France et Cired (2023), *Risques de transition : une analyse multi-modèles pour la France. Étude comparée de l'implémentation des scénarios du NGFS*, rapport final, mars. Cette étude a été réalisée dans le cadre du projet Finance ClimAct, encadré par l'Ademe, réunissant également ERASME-Seureco, le Cired et la Banque de France, dont l'objectif est d'évaluer l'impact macroéconomique de scénarios de transition écologique sur l'économie française.

<sup>2</sup> 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 Paper, juillet. L'étude fournit un chiffrage pour l'Union européenne (28 pays), où les capitaux échoués concernent quasi exclusivement la construction (99 %), pour un coût total annuel moyen estimé entre 150 et 310 milliards de dollars (selon que la transition est ordonnée ou retardée et précipitée). Le coût annuel moyen pour la France est ensuite interpolé à partir de ce chiffrage sur la base de la part française dans le stock de capital immobilier au niveau européen, de l'ordre de 20 %, soit entre 30 et 60 milliards de dollars.

brun prématurément, si la dépréciation, à son rythme normal, du capital brun ne suffit pas à assurer une transition assez rapide, du brun au vert, pour respecter les contraintes émissives (voir [annexe 1](#)). Une approche analogue a été utilisée par van der Ploeg et Rezai (2021)<sup>1</sup>, dans le cadre d'un modèle d'équilibre général dynamique et stochastique. Les auteurs contraignent les émissions de GES de sorte à respecter les objectifs de l'accord de Paris de limiter la hausse des températures moyennes mondiales entre 1,5 °C et 2 °C. Cette contrainte se traduit par une forte augmentation de la taxe carbone qui incite les entreprises à utiliser les énergies renouvelables. Par ailleurs, il en résulte une baisse de la demande pour les énergies fossiles, qui conduit à une diminution significative de la valeur du stock de pétrole et de gaz.

**Une seconde possibilité est de considérer que les entreprises n'utilisent pas pleinement leurs capacités de production, qu'elles peuvent moduler en fonction de diverses variables, comme la demande anticipée ou le risque de voir entrer un nouveau concurrent sur le marché.** Cette approche est retenue par certains modèles d'inspiration postkeynésienne. Dans ce cadre, un durcissement des contraintes sur les émissions de GES peut entraîner une moindre utilisation du capital lié aux activités les plus émissives, ce qui produit un choc négatif sur la productivité du capital installé. Jackson (2018)<sup>2</sup> modélise ainsi le capital échoué dans un secteur comme la part du capital qui n'est pas nécessaire à la production du bien final. Son étude fait la distinction entre le niveau de capital dont dispose un secteur à un moment donné (dépendant des choix d'investissement passés, faits sur la base des profits futurs anticipés) et le capital effectivement utilisé pour produire, l'écart entre les deux correspondant à la quantité de capital échoué. Celui-ci résulte donc d'une non-prise en compte, dans les investissements passés, des futures contraintes environnementales qui prennent par surprise les agents et viennent finalement limiter les débouchés des secteurs émissifs. Les simulations montrent que l'échouage des actifs est d'autant plus important que la transition est rapide et mal anticipée par les agents (de 20 % à 70 % selon le scénario de transition et les hypothèses d'anticipations).

Dans ce même cadre des modèles à stocks et flux cohérents, Gourdel *et al.* (2022)<sup>3</sup> a mené une analyse prenant en compte les interactions entre climat, système financier et économie réelle, dans l'évaluation macroéconomique de trois scénarios de transition énergétique du NGFS (transition ordonnée, transition désordonnée et prolongement des politiques actuelles). Dans cette étude, la mise en place d'une politique de transition

---

<sup>1</sup> van der Ploeg F. et Rezai A. (2021), « [Optimal carbon pricing in general equilibrium: Temperature caps and stranded assets in an extended annual DSGE model](#) », *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 110, octobre.

<sup>2</sup> Jackson A. (2018), « A stock-flow consistent framework for the analysis of stranded assets and the transition to a low carbon economy », thèse de doctorat en environnement et développement durable à l'université de Surrey.

<sup>3</sup> Gourdel R., Monasterolo I. Dunz N., Mazzocchetti A. et Parisi L. (2022), « [The double materiality of climate physical and transition risks in the euro area](#) », Banque centrale européenne, Working Paper, n° 2665, mai.



énergétique se traduit par des difficultés pour les entreprises extractives ou très consommatrices d'énergies fossiles, qui voient leurs coûts augmenter et leurs débouchés se réduire. Par conséquent leur rentabilité baisse, ce qui conduit les banques à réévaluer à la hausse leur risque de crédit et donc à moins leur prêter. La contraction de l'activité qui touche ces secteurs ouvre la possibilité à l'échouage de tout ou partie de leurs actifs. L'étude montre également l'importance de l'ancrage des anticipations par les agents de la trajectoire future du prix du carbone : plus celle-ci est anticipée à l'avance, moindre est le risque d'échouage. En revanche, contrairement à l'étude de Jackson, le travail de la BCE ne quantifie pas explicitement la perte de capital induite.

**Il apparaît également que des modèles à croissance endogène se révèlent pertinents pour mieux comprendre l'échouage des actifs bruns.** En effet, le développement des technologies vertes est sujet à des effets d'apprentissage susceptibles de générer des externalités positives de production se transmettant d'une entreprise innovatrice à ses concurrentes, et entraînant une augmentation de la productivité ainsi qu'une baisse des coûts dans les secteurs concernés. Ce phénomène est identifiable dans la production d'énergies renouvelables, dont les prix ont significativement baissé ces dernières années. Une étude de Baldwin *et al.* (2020)<sup>1</sup> s'intéresse ainsi à la prise en compte des effets d'apprentissage dans les secteurs verts. L'hypothèse de modélisation retenue est que le prix du bien vert est une fonction décroissante du capital humain, du fait de l'effet bénéfique de l'apprentissage sur le coût des technologies. Plus l'accumulation du capital humain et des infrastructures à la base de la production décarbonée est importante, et plus la compétitivité relative du vert, face au brun, s'améliore. L'effet d'apprentissage dans les secteurs verts fait apparaître plus tôt que prévu (par rapport à si on l'avait négligé) un substitut, compétitif, aux énergies carbonées. Par conséquent, il accélère la transition et avance le moment où l'investissement brun s'arrête. En fin de période, il y a moins d'actifs échoués car il y a eu moins d'investissements dans le brun au début. D'où l'intérêt, montré par l'article (Baldwin *et al.*, 2020), d'accompagner la taxation du carbone d'une subvention aux renouvelables.

Selon l'approche, la manière de prendre en compte le capital échoué dans les modèles macroéconomiques peut se faire soit de façon exogène, en introduisant des chroniques de capitaux échoués estimées par des travaux empiriques, soit de façon endogène, en permettant aux agents de modifier leur comportement, et donc de choisir, sur la base d'un calcul rationnel, de jeter prématurément du capital brun si les contraintes d'émissions les y obligent. L'intérêt de la première approche est qu'elle s'appuie sur des travaux fondés empiriquement et qu'elle permet de tester des scénarios macroéconomiques incluant des niveaux « réalistes » d'actifs échoués. L'intérêt de l'endogénéité, quant à lui, est de ne pas considérer le comportement des agents comme

---

<sup>1</sup> Baldwin E., Cai Y. et Kuralbayeva K. (2020), « [To build or not to build? Capital stocks and climate policy](#) », *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 100, mars.

donné *a priori* mais de le représenter comme le résultat d'un calcul économique les amenant à s'ajuster aux contraintes environnementales (en mettant au rebut une partie du capital brun, par exemple). Même si cette approche microfondée des capitaux échoués est séduisante, elle peut néanmoins se heurter à des questions de calibrage susceptibles de mettre en question le caractère réaliste des chroniques ainsi obtenues.

### 3. Quelle élasticité de substitution entre facteurs de production retenir ?

**La dynamique des modèles macroéconomiques utilisés pour évaluer l'impact des mesures de décarbonation est conditionnée par la spécification et le calibrage des équations comportementales, notamment de la fonction de production et des élasticités de substitution entre les facteurs.**

L'évaluation *ex ante* de l'impact macroéconomique d'une obsolescence accélérée d'une partie du stock de capital sur des variables d'intérêt (production, consommation, emploi etc.), mais également de l'ampleur possible des montants de capital échoué, dépend largement du calibrage des élasticités de substitution entre facteur de production, et plus largement, du choix de la forme de la fonction de production (Cobb-Douglas ou CES<sup>1</sup>) et du nombre de facteurs modélisés. Le maintien d'un niveau de production compatible avec les objectifs de décarbonation nécessite notamment que le capital et l'énergie soient effectivement substituables. Sous l'hypothèse d'une élasticité de substitution entre le capital et l'énergie (notamment fossile) complémentaire, toute mesure contraignant l'utilisation d'intrants énergétiques (carbonés) pourrait s'accompagner d'une diminution du stock de capital mobilisé pour la production. La moindre utilisation de ces deux facteurs pourrait alors conduire à une baisse de la production, *modulo* l'ajustement du facteur travail et le progrès technologique, ainsi qu'à l'échouage de la partie du stock de capital qui n'est plus mobilisée, si celle-ci ne peut pas être convertie pour un autre usage économique. La décarbonation aurait alors un coût économique plus élevé que si le capital et l'énergie étaient substituables.

---

<sup>1</sup> Constant Elasticity of Substitution.

Si certains modèles sont calibrés à partir d'estimations économétriques de ces élasticités – tels que les modèles ThreeME à partir de la méta-analyse de Stern (2009)<sup>1</sup>, ou Vulcain 2 à partir d'Henriet *et al.* (2014)<sup>2</sup> –, trois limites transversales peuvent néanmoins être soulignées :

- les calibrages s'appuient sur plusieurs définitions des élasticités de substitution, dont les propriétés diffèrent significativement ;
- le choix de la forme de la fonction de production est réalisé de façon *ad hoc*, et non en cohérence avec les données sous-jacentes à l'estimation des élasticités ;
- dans le cas où plusieurs secteurs d'activité sont modélisés, les élasticités de substitution et la fonction de production sont généralement supposées identiques.

De façon générale, l'estimation économétrique des élasticités de substitution, utilisées pour calibrer les modèles macroéconomiques, devrait répondre aux deux critères suivants, définis sur la base de la méta-analyse de Broadstock *et al.* (2007)<sup>3</sup> sur 242 articles :

- s'appuyer idéalement sur une fonction de coût de production *trans-log* dynamique, qui permet de vérifier la forme fonctionnelle la plus cohérente avec les données sous-jacentes ;
- utiliser des élasticités estimées pour le pays modélisé, et non recourir aux estimations portant sur d'autres pays du fait de la forte hétérogénéité dans les résultats.

Il est également à noter que les estimations sont conditionnées par la nature des données utilisées : elles apparaissent plus faibles lorsque les estimations sont réalisées en panel plutôt qu'à partir de séries temporelles, et plus encore lorsque des données en *cross-section* sont mobilisées.

Dans le cas de la France, cinq travaux empiriques visant à estimer les élasticités de substitution entre facteurs de production, au nombre maximum de trois (capital, travail et énergie), ont été identifiés (voir tableau en [annexe 2](#)). Quatre articles supposent une forme fonctionnelle de type CES préalable aux estimations économétriques et un seul a recours à une fonction *trans-log* statique. Par ailleurs, quatre articles s'appuient sur des données de la comptabilité nationale et un sur des données d'entreprises. L'élasticité de substitution estimée entre le capital et l'énergie est comprise entre - 0,043 (hypothèse de complémentarité) et 1 (fonction Cobb-Douglas).

---

<sup>1</sup> Stern D. I. (2009), *Interfuel Substitution: A Meta-Analysis*, rapport de recherche, juin.

<sup>2</sup> Henriet F., Maggjar N. et Schubert K. (2014), « *A stylized applied energy-economy model for France* », *The Energy Journal*, vol. 35(4).

<sup>3</sup> Broadstock D. C., Hunt L. et Sorrell S. (2007), « *UKERC Review of Evidence for the Rebound Effect. Technical Report 3: Elasticity of substitution studies* », UK Energy Research Centre, Working Paper, octobre.





## CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

---

Dans le cadre de la transition écologique, le marché des capitaux (productif et financier) est principalement exposé à un risque de capital échoué. La minimisation de ce risque passe par une stratégie de décarbonation crédible de moyen-long terme, de sorte à donner suffisamment de visibilité aux agents économiques pour qu'ils puissent anticiper les effets des politiques climatiques et adapter leurs décisions en conséquence. La substitution du capital à l'énergie (d'origine fossile) pourrait par ailleurs être facilitée par des mesures d'accompagnement, ciblées et financées auprès des ménages et des entreprises, et de soutien à l'innovation, afin de réduire les coûts d'investissements.

Néanmoins, ce risque reste difficilement appréciable, en particulier pour la France. La très grande majorité des travaux empiriques dans la littérature visant à apprécier les montants de capitaux échoués portent uniquement sur le secteur d'extraction des énergies fossiles (dans la mesure où il s'agit du secteur le plus directement exposé aux risques de transition), pour lequel les pays européens ne sont que peu concernés directement.

Il apparaît dès lors pertinent d'approfondir les travaux d'évaluation pour la France et les principales économies européennes (qui risquent d'influer sur le bouclage international), selon une approche *bottom-up* :

- de la part du stock de capital physique contemporain exposé au risque d'échouage – ces travaux serviraient notamment à affiner la liste des secteurs et des actifs concernés ;
- des montants de capital échoué à proprement parler, qui nécessitent un certain nombre d'hypothèses supplémentaires, relatives aux scénarios de transition retenus (ordonnée ou retardée) et aux chroniques d'investissements de décarbonation.

De nombreuses sources d'incertitudes demeurent quant à la matérialisation des effets du changement climatique, aux politiques de transition écologique, ainsi qu'à leurs effets socioéconomiques. En particulier, il existe une probabilité non nulle que ces différents chocs, dont le capital échoué, aient un impact macrofinancier pouvant obérer la croissance économique, le financement de l'économie et dès lors renchérir le coût de la transition, notamment si les politiques d'atténuation sont mises en place de façon désordonnée et retardée. Par ailleurs, les outils de modélisation, notamment macroéconomiques, présentent un certain nombre de limites. Dans le cas du risque de capital échoué, si un

certain nombre de canaux de transmission peuvent être *a priori* identifiés, conduisant à envisager un impact négatif sur l'activité ou l'emploi (notamment via le renchérissement du coût du capital), leur intégration dans les modèles macroéconomiques demeure fruste. Ainsi, la définition des politiques de décarbonation ne peut pas être exclusivement conditionnée aux évaluations *ex ante* de leur impact (Stern et Stiglitz, 2021<sup>1</sup>).

En parallèle, des travaux de recherche pourraient être menés pour améliorer la pertinence des outils d'évaluation. Dans le cas du présent rapport thématique, deux axes de recherche prioritaires ont été identifiés :

- réaliser des études économétriques pour estimer les élasticités de substitution entre facteurs de production (*a minima* travail, capital et énergie), ainsi que la spécification de la fonction de production, en cohérence avec les données françaises ;
- approfondir les méthodes pour intégrer le capital échoué dans un modèle macroéconomique, ainsi que la modélisation des différents canaux de transmission macrofinanciers, pour en évaluer les effets de façon cohérente.

---

<sup>1</sup> Stern N. et Stiglitz J. (2021), « [The social cost of carbon, risk, distribution, market failures: An alternative approach](#) », NBER Working Paper n° 28472, février.



# ANNEXES

---







## ANNEXE 1

# PRÉSENTATION DU MODÈLE-JOUET DE L'INSEE POUR ÉTUDIER LE CAPITAL ÉCHOUÉ DANS LE CADRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE

---

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

### Introduction

Le modèle<sup>1</sup> vise à représenter la décarbonation du système productif français induite par la transition énergétique. Pour cela, une dichotomie stylisée du capital est proposée : celui-ci est soit brun, émissif de gaz à effet de serre (GES), soit vert, non émissif, dans le cadre d'un modèle-jouet à la Ramsey à une seule région (la France). L'idée est de s'intéresser à la vitesse de la transition du brun au vert, en fonction des politiques climatiques conduites, se traduisant par des objectifs d'émissions de GES choisis, et en tenant compte de la possibilité d'un échouage du capital brun (consistant ici à en mettre tout ou partie au rebut, et non seulement à ajuster son taux d'utilisation, comme dans Rozenberg *et al.*, 2017<sup>2</sup>). Qu'implique le respect de ces objectifs pour l'évolution des flux d'investissements et des stocks de capital, brun et vert, dans les prochaines décennies ? En particulier, qu'en est-il de l'échouage du capital brun : faudra-t-il en mettre une partie prématurément au rebut pour atteindre les cibles climatiques ?

---

<sup>1</sup> Cette annexe décrit en détail le modèle stylisé présenté dans l'encadré « Quelques enseignements d'un modèle stylisé de décarbonation par le capital » du rapport de synthèse [Les incidences économiques de l'action pour le climat](#).

<sup>2</sup> Rozenberg J., Vogt-Schilb A et Hallegatte S. (2017), « [Instrument choice and stranded assets in the transition to clean capital](#) », Inter-American Development Bank Working Paper, n° IDB-WP-782, mars.

## Présentation du modèle

### Secteur productif

Il existe un seul bien final, produit par la combinaison de trois intrants, les capitaux, brun et vert, et le travail. L'année  $t$ , la quantité produite de bien final est  $Y_t = F(K_{t-1}^b, K_{t-1}^v, \bar{L})$ . La croissance démographique étant supposée nulle, la population demeure constante dans le temps, et reste égale au niveau  $\bar{L}$ . Dans notre choix de modélisation, les deux formes de capital ne sont pas exclusives l'une de l'autre : elles co-existent dans l'économie. À l'équilibre, leur part respective dépend de leur productivité spécifique et de leur substituabilité (voir partie « Calibrage » *infra*). Sur le plan environnemental, le processus productif émet des GES, et cela du seul fait du capital brun déjà installé, le vert n'émettant pas. Ainsi  $e_t = e_b K_{t-1}^b$ , où  $e_t$  représente le flux total d'émissions et  $e_b$  l'émissivité par unité de capital brun.

Pour prendre en compte l'existence de puits de carbone, une partie du capital brun est considérée comme « protégée », c'est-à-dire que sa quantité est maintenue constante dans le temps et est calculée de sorte à ce que les émissions qui en émanent saturent le puits de carbone national. Une fois déprécié, il est systématiquement remplacé. On note  $\underline{K}^b$  le capital brun protégé, tandis que le non protégé est noté  $\tilde{K}_t^b$ . On a donc :  $K_t^b = \tilde{K}_t^b + \underline{K}^b$ .

Chaque année  $t$ , le capital, brun comme vert, est soumis à la dynamique suivante :

- une fraction  $\delta$  du capital disparaît ;
- un investissement  $I_t^i$  ( $i = b, v$ ) a lieu et une partie du capital brun ( $\phi_t^b$ ) est mise au rebut (capitaux échoués). Le niveau d'investissement en capital brun se compose de deux parties : l'une,  $\underline{I}^b = \delta \underline{K}^b$ , ne sert qu'au renouvellement du capital brun protégé, qui n'est pas concerné par l'échouage ; l'autre,  $\tilde{I}_t^b$ , est l'investissement dans le capital brun non protégé, si bien que  $I_t^b = \tilde{I}_t^b + \underline{I}^b$ .

### Contraintes sur les émissions

Les ambitions en matière de lutte contre le réchauffement climatique sont représentées sous la forme de contraintes sur les émissions nettes de GES. Leur introduction favorise le capital vert au détriment du capital brun dans le processus productif.

Trois types de contraintes sont considérées :

- une contrainte de zéro émission nette (ZEN) à partir de l'année  $T_E$ :  $K_t^b = \underline{K}^b, t \geq T_E$ ,  
 $\phi_{T_E} = K_{T_E-1}^b - \underline{K}^b$  ;

- un budget carbone, sur les émissions nettes cumulées, compatible avec une limitation du réchauffement climatique à moins de 1,5 °C ou de 2 °C :

$$\sum_{t=t_0}^{T_E} e_t \leq E_{max}$$

où  $t_0$  est la date d'introduction de la contrainte dans l'économie. Dans les applications, nous partons de  $t_0 = 2019$  ;

- des contrainte(s) sur le flux des émissions l'année  $tl$ , telle(s) que  $e_{tl} \leq \underline{e}_{tl}$ . Par exemple, « Fit for 55 » pour 2030 :  $e_{2030} \leq 0,45 \times e_{1990}$ .

Ces contraintes sont aussi une manière indirecte de prendre en compte le coût des dommages liés au changement climatique, non explicitement modélisé. En effet, c'est précisément pour atténuer ce coût qu'il est rationnel d'investir dans le verdissement du système productif.

### **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 les contraintes suivantes :

- l'équilibre ressources – emplois ;
- l'accumulation du capital ;
- une ou plusieurs contraintes sur les émissions nettes (voir *supra*).

L'équilibre est atteint, par résolution du programme suivant, assorti des contraintes précisées ci-dessous.

$$\begin{aligned} - \quad & \max_{\substack{\tilde{I}_1^b, \dots, \tilde{I}_{T_E}^b \geq 0 \\ \phi_1^b, \dots, \phi_{T_E}^b \geq 0 \\ I_1^v, \dots, I_t^v, \dots \geq 0}} \sum_{t=t_0}^{+\infty} \frac{u(C_t)}{(1+\rho)^{t-t_0}} \end{aligned}$$

- Équilibre ressources-emplois :

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

Ce qui est produit à l'aide du capital installé (duquel on enlève le capital échoué  $\phi_t^b$ ) est utilisé pour la consommation et pour investir en capital brun ou vert à la date courante.

– Accumulation des capitaux brun et vert :

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

Ces équations décrivent la dynamique d'accumulation du capital brun non protégé et du capital vert. Le capital brun protégé reste constant et son investissement ne sert qu'à le renouveler.

– Contraintes carbone :

- contrainte ZEN :  $\phi_{T_E-1}^b = \tilde{K}_{T_E-1}^b$  avec  $\tilde{K}_t^b = \tilde{I}_t^b = \phi_t^b = 0, K_t^b = \underline{K}^b, \forall t \geq T_E$  ;
- contrainte(s) ponctuelle(s) sur les émissions annuelles :  $e_{tl} \leq \acute{e}_{tl}, \phi_{tl-1}^b = \max\left(\tilde{K}_{t-1}^b - \frac{\acute{e}_{tl}}{e_b}, 0\right)$  ;
- budget carbone à ne pas dépasser :  $\sum_{t=t_0}^{T_E} e_t \leq E_{max}$  avec  $e_t = e_b K_{t-1}^b$ .

### Solutions stationnaires

L'économie est supposée se trouver dans un équilibre stationnaire, avant  $t_0$ , dans lequel capitaux brun et vert coexistent. Leurs niveaux respectifs,  $K_0^v$  et  $K_0^b$ , sont solutions des équations :

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

Au début de  $t_0 + 1$ , l'économie se trouve dans un état stationnaire. Mais les contraintes carbone sont révélées avant de prendre les décisions d'investissement et de consommation, qui les prennent en compte et font sortir l'économie de son état stationnaire.

Entre  $t_0 + 1$  et  $T_E$ , les différentes contraintes carbone peuvent s'appliquer (notamment ponctuelles), générant des chocs dans l'économie l'empêchant de revenir vers un état stationnaire.

Au-delà de  $T_E$ , la contrainte de ZEN s'impose et l'environnement devient stable. Le seul capital brun restant est le capital brun protégé ( $\underline{K}^b$ ), 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 ainsi obtenu ( $K_\infty^v$ ) est solution de l'équation :

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

### Coût marginal d'abattement

Le coût marginal d'abattement correspond à la baisse de la production à laquelle il faut consentir pour réduire d'une tonne les émissions de GES. D'après le modèle, on peut l'écrire ainsi l'année  $t$  :

$$CA_t = \frac{\sum_{s=t}^{\infty} \left(\frac{1-\delta}{1+\rho}\right)^{s-t} \left(\frac{\partial F}{\partial K^b}(K_s^b, K_s^v) - \frac{\partial F}{\partial K^v}(K_s^b, K_s^v)\right)}{\sum_{s=t}^{\infty} (1-\delta)^{s-t} e_b}$$

Par conséquent, il est nul à l'état stationnaire de départ, car :  $\frac{\partial F}{\partial K^b}(K_0^b, K_0^v) = \frac{\partial F}{\partial K^v}(K_0^b, K_0^v)$ .

Enfin, à l'état stationnaire de long terme, il s'écrit :

$$CA_{\infty} = \frac{\delta(1+\rho)}{e_b(\rho+\delta)} \left( \frac{\partial F}{\partial K^b}(\underline{K}^b, K_{\infty}^v) - \frac{\partial F}{\partial K^v}(\underline{K}^b, K_{\infty}^v) \right)$$

Ainsi, plus la quantité de capital brun installée est faible, plus il est coûteux d'abattre une tonne supplémentaire de GES.

### Résolution numérique

La résolution du programme du planificateur se fait par une approximation numérique, inspirée de Mercenier et Michel (1994)<sup>1</sup>. Il s'agit d'utiliser l'équivalence asymptotique entre ce programme et un autre, défini en temps fini.

Dans ce cadre (et ci-après dans le cas où on n'introduit pas les contraintes climatiques), le programme du planificateur s'étend sur une séquence de moments finis  $t(1), \dots, t(N)$ , avec  $N \rightarrow +\infty$  :

$$\left\{ \begin{array}{l} \max_{\substack{0 \leq i_{t(1)}^b, \dots, i_{t(N)}^b \leq 1 \\ 0 \leq i_{t(1)}^v, \dots, i_{t(1)}^v \leq 1}} \sum_{n=1}^N \alpha_n u \left( (1 - i_{t(n)}^b)(1 - i_{t(n)}^v) F(K_{t(n-1)}^b, K_{t(n-1)}^v) \right) + \frac{\alpha_N}{\rho} u \left( F(K_{t(N)}^b, K_{t(N)}^v) \right) \\ K_{t(n+1)}^b - K_{t(n)}^b = \Delta_n \left( -\delta K_{t(n)}^b + i_{t(n)}^b F(K_{t(n-1)}^b, K_{t(n-1)}^v) \right) \\ K_{t(n+1)}^v - K_{t(n)}^v = \Delta_n \left( -\delta K_{t(n)}^v + (1 - i_{t(n)}^b) i_{t(n)}^v F(K_{t(n-1)}^b, K_{t(n-1)}^v) \right) \end{array} \right.$$

où  $\Delta_n = t(n+1) - t(n)$ , et  $\alpha_{n+1} = \frac{\alpha_n}{1+\rho\Delta_n}$ , le dernier niveau de consommation atteint correspondant à celui obtenu dans le cas où le niveau de capital resterait constant et que les investissements ne feraient plus que compenser la dépréciation du capital.

<sup>1</sup> Mercenier J. et Michel P. (1994), « Discrete-time finite horizon approximation of infinite horizon optimization problems with steady-state invariance », *Econometrica*, vol. 62(3), mai, p. 635-556.

D'après Mercenier et Michel (1994), ce programme est asymptotiquement équivalent à celui exprimé plus haut.

Il existe une manière optimale de déterminer les pas de temps  $t(n)$ , en linéarisant le modèle autour de sa solution stationnaire. Néanmoins dans la pratique on choisit de faire coïncider le début de la séquence aux années comprises entre l'année de base, 2019, et la première année à zéro émission nette,  $T_E$ . Au-delà de cette date, on fait vieillir le modèle année après année, jusqu'en 2120, ce qui assure la convergence du modèle vers sa solution stationnaire.

## Calibrage

### 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  $F(k, \bar{L}) = k^\alpha \bar{L}^{1-\alpha}$ ,  $\bar{L} = 1$ , par normalisation, et  $k$  est 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  $\sigma$ . 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 investissements.

Pour l'utilité, on choisit :  $u(C) = \ln(C)$ . La concavité des fonctions de production et d'utilité garantit l'existence d'une solution stationnaire au programme du planificateur et la convergence vers cette solution.

### Initialisation et paramètres structurels

**Tableau A1 – Initialisation du PIB, du capital et des émissions de GES**

Variable	Niveau en 2019
PIB	2 426 Md €
Capital brun	7 333 Md €
Capital vert	815 Md €
Émissions de GES	434 MtCO <sub>2</sub> eq

Source : Insee, calcul des auteurs

Les niveaux de PIB et de capital net fixe installé total ont été initialisés à partir des données de la comptabilité nationale pour 2019. En revanche, la part du capital vert dans le capital total a été fixée *a priori* à 10 %, en attendant une estimation ultérieure plus fine, fondée sur l'analyse du compte de patrimoine par branche. Les émissions totales de GES en 2019 sont tirées de l'inventaire national (SDES, 2021).

Rapportées au PIB, elles permettent de calculer le coefficient d'émissivité du capital brun  $e_b$ . Pour le choix de l'élasticité de substitution  $\sigma$  entre capital brun et capital vert, on suit Papageorgiou *et al.* (2017) en la fixant à 3. Le paramètre  $\alpha$  peut, lui, être déduit des valeurs du PIB et des quantités de capitaux brun et vert à l'année de base :

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

Les valeurs des paramètres  $a_b$  et  $a_v$  peuvent être obtenues à partir des conditions du premier ordre à l'état stationnaire initial :

$$\ln a_b = \frac{1}{\alpha} \ln Y_{t_0} + \frac{1}{\sigma - 1} \ln K_{t_0}^b - \frac{\sigma}{\sigma - 1} \ln(K_{t_0}^b + K_{t_0}^v)$$

$$\ln a_v = \frac{1}{\alpha} \ln Y_{t_0} - \frac{\sigma}{\sigma - 1} \ln(K_{t_0}^b + K_{t_0}^v) + \frac{1}{\sigma - 1} \ln K_{t_0}^v$$

Pour le taux de dépréciation du capital, une valeur de 5 % est retenue, proche de celle que l'on peut estimer à partir des données de comptabilité nationale, en rapportant la consommation de capital fixe au capital fixe en 2019. Un taux d'actualisation de 2,5 % est choisi.

**Tableau A2 – Initialisation des paramètres structurels**

Paramètres structurels	Valeur
$\sigma$	3
$e_b$	0,05
$\alpha$	0,25
$a_b$	3,92
$a_v$	1,31
$\rho$	0,025
$\delta$	0,05

Source : calcul des auteurs

## Premiers résultats

Quatre principaux scénarios de transition, avec différents objectifs de réduction des émissions, sont évalués grâce au modèle-jouet :

- 1) zéro émission nette de GES à partir de 2050 ;
- 2) scénario 1 + cible intermédiaire de baisse des émissions nettes en 2030 de 55 % par rapport à 1990 (« Fit for 55 ») ;
- 3) scénario 1 + respect d'un budget carbone compatible avec un réchauffement de 1,5 °C ;
- 4) scénario 1 + cibles intermédiaires de baisse des émissions nettes tous les cinq ans, calibrées de sorte que le budget carbone de 1,5 °C est respecté.

Le budget carbone retenu est de 4,4 GtCO<sub>2</sub>eq. Il est déduit du budget carbone global, compatible avec une limitation du réchauffement à 1,5 °C, proposé par le Giec (2022), par application de la part de la France dans la population mondiale en 2019.

### **Scénario 1 – Zéro émission nette à partir de 2050**

Les investissements bruns commencent à baisser dès 2020, mais c'est seulement au début de la décennie 2030 qu'ils s'effondrent véritablement, pour tomber, en 2032, au niveau qui assure juste le renouvellement du capital brun protégé. L'évolution de l'investissement vert se fait en sens inverse. Alors qu'il est stable dans la décennie 2020, il connaît un « décollage » au début des années 2030, avec une accélération à l'approche de 2050 afin d'atténuer la baisse de la consommation qu'induirait l'échouage important du capital brun en 2049. En effet, celui-ci provoque une brusque décarbonation de l'économie et une forte réduction des capacités de production, qui doit être compensée par davantage de capital vert.

La transition du brun au vert est donc tardive : ce n'est qu'au bout d'une décennie que la contrainte ZEN 2050 enclenche vraiment le mouvement de transition.

Finalement, production et consommation baissent significativement en 2050, par rapport à 2019. La transition vers l'objectif ZEN induit donc une réduction de la consommation, et le surcroît d'investissement vert ne suffit pas à empêcher la production de baisser.

Au regard du budget carbone, l'objectif ZEN paraît insuffisant, puisqu'en 2050 plus de 9 GtCO<sub>2</sub>eq ont été émises, en net, soit plus du double du budget. Celui-ci est même déjà quasi épuisé en 2030.

### **Scénario 2 – Zéro émission nette à partir de 2050 + « Fit for 55 » en 2030**

L'ajout d'une cible intermédiaire en 2030 sur les émissions entraîne une baisse rapide de l'investissement brun, dont le niveau n'assure plus que le renouvellement du capital brun protégé dès le milieu des années 2020. Au même moment, l'investissement vert augmente. Il y a donc une avancée de la transition, qui est plus précoce que dans le scénario 1.



Néanmoins, le caractère ponctuel de la cible en 2030 génère un effet pervers. En effet, une fois que le capital brun s'est suffisamment déprécié pour satisfaire la nouvelle contrainte, il redevient rentable 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 ponctuelle se fait moins sentir.

L'objectif « Fit for 55 » ne permet pas non plus de respecter le budget carbone, puisque plus de 8 GtCO<sub>2</sub>eq sont émises en net en 2050, soit près de deux fois le budget.

### ***Scénario 3 – Zéro émission nette à partir de 2050 + budget carbone***

L'ajout d'un budget carbone contraignant accélère la transition observée dans le scénario 1. Dès 2020, l'investissement brun disparaît tandis que l'investissement vert décolle. Concernant l'échouage du capital, il a maintenant lieu à deux moments : une fois, la première année, entraînant une forte baisse du capital brun, et une seconde fois en 2049, à la veille de la neutralité carbone.

Dans ce scénario, la baisse de l'investissement brun est sans retour. Une fois qu'il a atteint son niveau minimal, il n'y a plus d'incitation à le relancer.

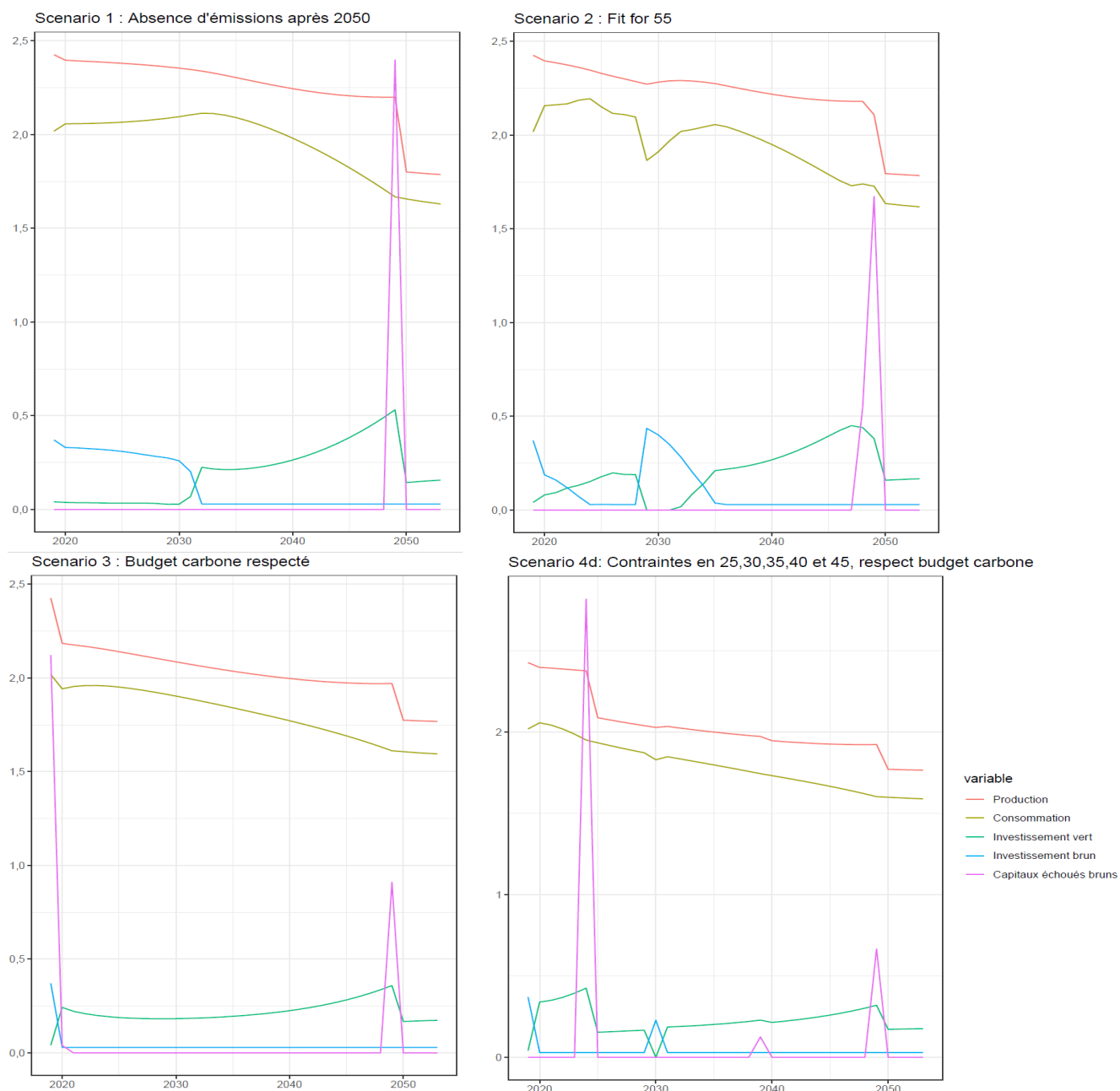
### ***Scénario 4 – Zéro émission nette à partir de 2050 + cibles intermédiaires tous les cinq ans compatibles avec le respect du budget carbone***

Ce scénario illustre la difficulté de faire respecter le budget carbone par l'utilisation de cibles d'émissions intermédiaires, y compris quand elles sont fixées à intervalle rapproché de cinq ans.

En effet, la forme de trajectoire en dents de scie, déjà observée dans le scénario 2, est ici encore plus marquée. D'abord pour l'investissement brun, qui disparaît dans la décennie 2020 (hors renouvellement du capital protégé) avant de réapparaître ponctuellement en 2030, puis de disparaître à nouveau. Ensuite pour l'investissement vert, qui connaît un essor au début des années 2020, disparaît en 2030, avant de croître à nouveau jusqu'en 2050. Enfin pour l'échouage du capital, qui se déroule ici en trois temps : en 2024, de manière très importante, un peu en 2039, et de manière significative en 2049, juste avant l'atteinte de la neutralité carbone.

Les cibles ponctuelles se révèlent être un outil délicat à ajuster pour le planificateur, en vue de respecter le budget carbone, et encore plus s'il souhaite éviter une évolution des investissements en dents de scie.

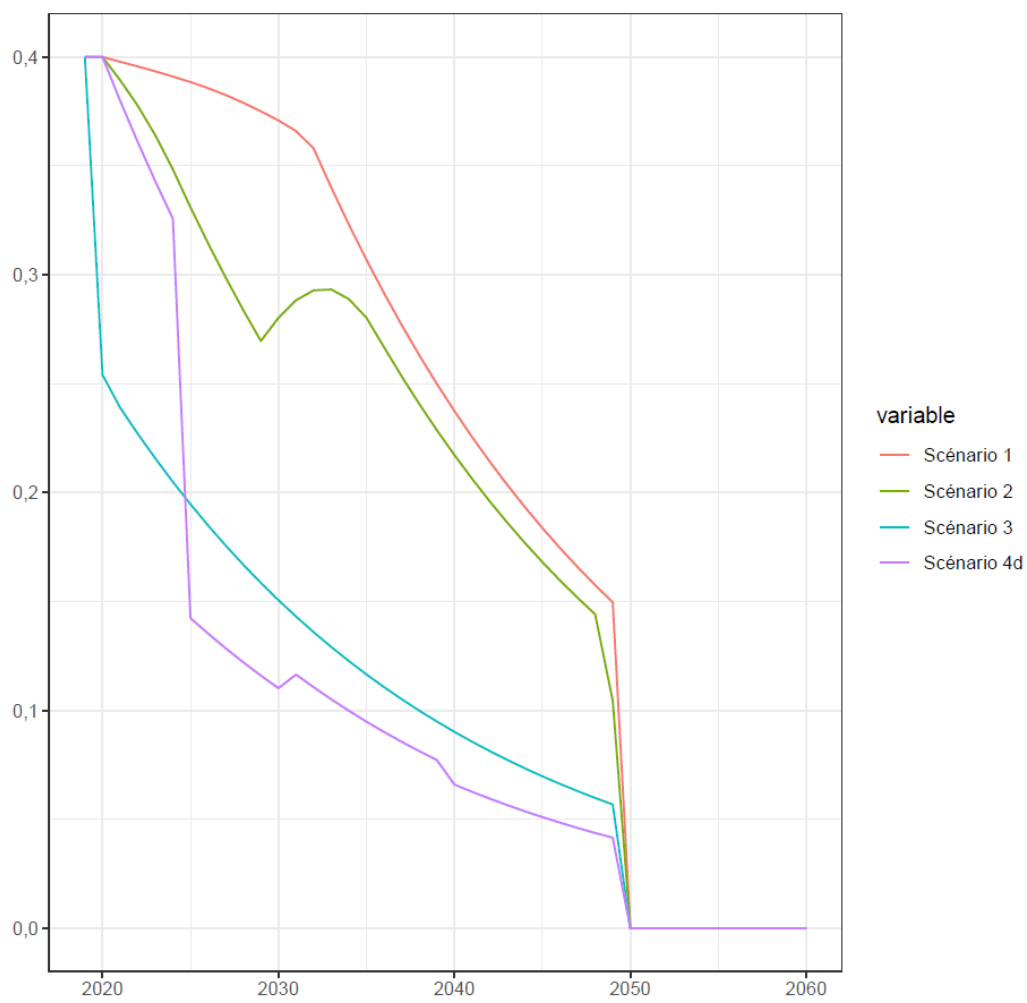
### Graphique A1 – Trajectoires des principales grandeurs économiques pour les différents scénarios simulés



Lecture : pour chaque scénario sont représentées les trajectoires annuelles de production, consommation, investissement brun et vert, ainsi que le niveau de capital brun échoué, en milliards d'euros. Au-delà de 2050, l'ensemble de ces variables convergent vers leurs valeurs stationnaires d'équilibre de long terme de l'économie. Dans le scénario 3, le budget carbone correspond à celui devant être respecté pour limiter le réchauffement à 1,5 °C. Tous les scénarios sont effectués sous la contrainte de zéro émission nette à partir de 2050.

Source : Insee ; calcul des auteurs

**Graphique A2 – Comparaison des niveaux d'émissions (en GtCO<sub>2</sub>eq) entre les différents scénarios**



Source : Insee ; calcul des auteurs





## ANNEXE 2

# REVUE DES ÉLASTICITÉS DE SUBSTITUTION

Référence	Période d'estimation	Type de données	Secteurs couverts	Sources des données	Forme fonctionnelle (1)	Définition de l'élasticité de substitution (2)	Méthode d'estimation économétrique	Élasticité	Résultats (3)
Henriet <i>et al.</i> (2014)	1986-2008	Comptes nationaux	Ensemble de l'économie	Insee, OCDE, FMI, CEREN et Pegase	CES (KE)L	Hicks	Non spécifié	KE	0,48*
								(KE)L	0,52*
van der Werf (2008)	1978-1996	Comptes nationaux	Six industries manufacturières et la construction	AIE et OCDE	CES (KE)L	Hicks	Pooled regression	KE	1,00*
					CES (KL)E			(KE)L	1,05*
								KL	0,42*
								(KL)E	0,35*
CES (LE)K	LE	0,79*							
(LE)K	0,38*								
Fiorito et van den Bergh (2015)	1981-2005	Comptes nationaux	Industries manufacturières	EU KLEMS	Fonction de coût de production <i>trans-log</i> statique KLE	CPES	3SLS	KE	-0,04*
								EK	-0,06*
								KL	-0,29*
								LK	-0,07*
								LE	-0,06*
						MES		EL	-0,34*
								KE	0,10**
								EK	0,06**
								KL	0,09**
								LK	0,08**
LE	0,04**								
EL	0,05**								

Référence	Période d'estimation	Type de données	Secteurs couverts	Sources des données	Forme fonctionnelle (1)	Définition de l'élasticité de substitution (2)	Méthode d'estimation économétrique	Élasticité	Résultats (3)
Lalanne <i>et al.</i> (2009)	1987-2008	Comptes nationaux	Secteur marchand	Insee	CES (KE)L	Hicks	OLS en différence	KE	0,23*
					(KE)L			0,36*	
					CES (KL)E			KL	1,00**
					(KL)E			0,44**	
			CES KLE		KLE		0,40**		
			CES (KL)E		OLS en niveau		KL	1,00**	
			(KL)E				0,29*		
			CES (KL)E				KL	1,00**	
			(KL)E				0,12*		
			CES (KL)E		KL		1,00**		
(KL)E	0,18**								
CES (KL)E	KL	1,00**							
(KL)E	0,20*								
Bretschger et Jo (2022)	1994-2015	Entreprises	Industries manufacturières	FARE et EACEI	CES LE	Hicks	Panel avec effets fixes	EL	0,80-0,81*
							Variables instrumentales	EL	0,61-0,64*

(1) Les fonctions sous-jacentes aux estimations économétriques sont de type fonction de production *Constant Elasticity of Substitution* (CES) ou fonction de coût de production *trans-log*, avec trois facteurs de production au maximum, capital (K), travail (L) et énergie (E). Les fonctions CES peuvent être imbriquées, alors indiquées par des parenthèses (par exemple, « (KL)E » indique que l'énergie est combinée avec un ensemble capital-travail, défini au second niveau par une autre fonction CES).

(2) Les élasticités de substitution sont définies au sens de Hicks (correspondant au paramètre usuel d'une fonction CES), de Morishima (MES) ou *cross-price* (CPES).

(3) \* : significatif à 5 %, \*\* : calculé à partir des hypothèses relatives à la forme de la fonction de production, des données sous-jacentes ou des estimations économétriques.

Source : travaux des auteurs



## BIBLIOGRAPHIE

---

- ACPR (2021), « [A first assessment of financial risks stemming from climate change: The main results of the 2020 climate pilot exercise](#) », Banque de France, *Analyses et synthèses*, n° 122-2021, avril.
- Ademe, Seureco, Banque de France et Cired (2023), [Risques de transition : une analyse multi-modèles pour la France. Étude comparée de l'implémentation des scénarios du NGFS](#), rapport final, mars.
- AIE (2014), [World Energy Investment Outlook. World Energy Outlook Special Report](#), Agence internationale de l'énergie, juin.
- AIE (2013), [Redrawing the Energy Climate Map. World Energy Outlook Special Report](#), Agence internationale de l'énergie, juin.
- Allen T., Dees S., Boissinot J., Caicedo C. M., Chouard V., Clerc L., De Gaye A., Devulder A., Diot S., Lisack N., Pegoraro F., Rabaté M., Svartzman R. et Vernet L. (2020), « [Climate-related scenarios for financial stability assessment: An application to France](#) », Banque de France, Working Paper, n° 774, juillet.
- Baldwin E., Cai Y. et Kuralbayeva K. (2020), « [To build or not to build? Capital stocks and climate policy](#) », *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 100, mars.
- Banque d'Angleterre (2015), [The Impact of Climate Change on the UK Sector: A Climate Change Adaptation Report by the Prudential Regulation Authority](#), septembre.
- Baron R. et Fischer D. (2015), « [Divestment and stranded assets in the low-carbon transition](#) », document de référence pour la 32<sup>e</sup> table ronde sur le développement durable le 28 octobre 2015, OCDE.
- Battiston S., Mandel A., Monasterolo I., Schütze F. et Visentin G. (2017), « [A climate stress-test of the financial system](#) », *Nature Climate Change*, vol. 7, mars, p. 283-288.
- Bonnet C., Carcanague S., Hache E., Seck G. et Simoën M. (2018), « [The nexus between climate negotiations and low-carbon innovation: A geopolitics of renewable energy patents](#) », EconomiX, Working Paper n° 2018-45, octobre.
- Bonneuil C. et Fressoz J.-B. (2016), *L'Évènement anthropocène. La Terre, l'histoire et nous*, Paris, Éditions du Seuil.

- Bretschger L. et Jo A. (2022), « [Complementarity between labor and energy: A firm-level analysis](#) », CER-ETH Economics working paper, mai.
- Broadstock D. C., Hunt L. et Sorrell S. (2007), « [UKERC Review of Evidence for the Rebound Effect. Technical Report 3: Elasticity of substitution studies](#) », UK Energy Research Centre, Working Paper, octobre.
- Cahen-Fourot L., Campiglio E., Godin A., Kemp-Benedict E. et Trsek S. (2021), « [Capital stranding cascades: The impact of decarbonisation on productive asset utilization](#) », AFD Research Papers, n° 204, mars.
- Caldecott B., Howarth N. et McSharry P. (2013), [Stranded Assets in Agriculture: Protecting Value from Environment-Related Risks](#), *Smith School of Enterprise and the Environment*, août.
- Caldecott B., Clark A., Koskelo K., Mulholland E. et Hickey C. (2021), « [Stranded assets: Environmental drivers, societal challenges, and supervisory responses](#) », *Annual Review of Environment and Resources*, vol. 46, octobre, p. 417-447.
- Calel R. et Dechezleprêtre A. (2016), « [Environmental policy and direct technological change: Evidence from the European carbon market](#) », *Review of Economics and Statistics*, vol. 98(1), p. 173-191.
- Campanale M., Leggett J. et Leaton, J. (2011), [Unburnable Carbon: Are the World's Financial Markets Carrying a Carbon Bubble?](#), rapport, Carbon Tracker Initiative, juillet.
- Carbon Delta (2019), « [Modelling the impact of climate change on the financial risk of investments](#) », Finance for the Future.
- Carbon Tracker Initiative (2015), [The \\$2 Trillion Stranded Assets Danger Zone: How Fossil Fuel Firms Risk Destroying Investor Returns](#), rapport, juillet.
- Carney M. (2015), « [Breaking the tragedy of the horizon - Climate change and financial instability](#) », discours au Lloyd's of London le 29 septembre 2015.
- Channell J., Curmi E., Nguyen P., Prior E., Syme A. R. Jansen H. R., Rahbari E., Morse E. L., Kleinman S. M. et Kruger T. (2015), [Energy Darwinism II: Why a Low Carbon Future Doesn't Have to Cost the Earth](#), Citigroup, août.
- Daumas L. (2023), « [Financial stability, stranded assets and the low carbon transition – A critical review of the theoretical and applied literatures](#) », *Journal of Economic Surveys*, mars.
- Dietz S., Bowen A., Dixon C. et Gradwell P. (2016), « Climate value at risk of global financial assets », *Nature Climate Change*, vol. 6, avril, p. 676-679.
- Dunz N., Naqvi A. et Monasterolo I. (2021), « Climate sentiments, transition risk, and financial stability in a stock-flow consistent model », *Journal of Financial Stability*, vol. 54(C).
- Ferrari M. et Pagliari M. S. (2021), « [No country is an island. International cooperation and climate change](#) », Banque de France, Working Paper n° 815, août.



- Fiorito G. et van den Bergh J. (2015), « Capital-energy substitution in manufacturing for seven OECD countries: learning about potential effects of climate policy and peak oil », *Energy Efficiency*, vol. 9(1), avril, p. 1-17.
- FMI (2022), « [A Greener Labor Market: Employment, Policies, and economic transformation](#) », chapitre 3 du *World Economic Outlook: War Sets Back the Global Recovery*, avril.
- 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, document de travail n° 2022/2, septembre.
- Geels F. W. (2013), « [The impact of the financial-economic crisis on sustainability transitions: Financial investment, governance and public discourse](#) », *Environmental Innovation and Societal Transitions*, vol. 6, mars, p. 67-95.
- Geels F. W., Sovacool B. K., Schwanen T. et Sorrell S. (2017), « [The socio-technical dynamics of low-carbon transitions](#) », *Joule*, vol. 1(3), novembre, p. 463-479.
- Generation Foundation (2013), « [Stranded carbon assets: Why and how carbon risks should be incorporated in investment analysis](#) », octobre.
- Giec (2022), *Climate Change 2022. Mitigation of Climate Change – Summary for Policymakers*, contribution du troisième groupe de travail au sixième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.
- Gourdel R., Monasterolo I. Dunz N., Mazzocchetti A. et Parisi L. (2022), « [The double materiality of climate physical and transition risks in the euro area](#) », Banque centrale européenne, Working Paper, n° 2665, mai.
- Hansen T. A. (2022), « [Stranded assets and reduced profits: Analyzing the economic underpinnings of the fossil fuel industry's resistance to climate stabilization](#) », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 158, avril.
- Henriet F., Maggiar N. et Schubert K. (2014), « [A stylized applied energy-economy model for France](#) », *The Energy Journal*, vol. 35(4).
- Ivanov I., Kruttli M. et Watugala S. (2020), « [Banking on carbon: Corporate lending and cap-and-trade policy](#) », SSRN Electronic Journal, avril.
- 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 Paper, juillet.
- Jackson A. (2018), « A stock-flow consistent framework for the analysis of stranded assets and the transition to a low carbon economy », thèse de doctorat en environnement et développement durable à l'université de Surrey.
- Jacquetin F. (2021), « [Stress-tests climatiques par scénarios. De l'analyse de risques à la modélisation](#) », Ademe, document de travail, février.

- Lalanne G., Pouliquen E. et Simon O. (2009), « [Prix du pétrole et croissance potentielle à long terme](#) », Insee, document de travail, n° G2009/09, octobre.
- Lewis M. (2014), « [Stranded assets, fossilised revenues](#) », Kepler Cheuvreux, avril.
- Linquiti P. et Cogswell N. (2016), « [The Carbon Ask: Effects of climate policy on the value of fossil fuel resources and the implications for technological innovation](#) », *Journal of Environmental Studies and Sciences*, vol. 6, mai, p. 662-676.
- Manley D., Cust J. K. et Cecchinato G. (2017), « [Stranded nations? The climate policy implications for fossil fuel-rich developing countries](#) », Oxford Centre for the Analysis of Resource Rich Countries, Policy Paper, n° 34.
- McGlade C. et Ekins P. (2015), « The geographical distribution of fossil fuels unused when limiting global warming to 2 °C », *Nature*, vol. 517, janvier, p. 187-190.
- Mercenier J. et Michel P. (1994), « Discrete-time finite horizon approximation of infinite horizon optimization problems with steady-state invariance », *Econometrica*, vol. 62(3), mai, p. 635-556.
- Mercure J. F., Pollitt H., Viñuales J. E., Edwards N. R., Holden P. B., Chewpreecha U., Salas P., Sognnaes I., Lam A. et Knobloch F. (2018), « Macroeconomic impact of stranded fossil fuel assets », *Nature Climate Change*, vol. 8, juin, p. 588-593.
- Monasterolo I. (2020), « Climate Change and the Financial System », *Annual Review of Resource Economics*, vol. 12, octobre, p. 299-320.
- Muldoon-Smith K. et Greenhalgh P. (2019), « [Suspect foundations: Developing an understanding of climate-related stranded assets in the global real estate sector](#) », *Energy Research & Social Science*, vol. 54, août, p. 60-67.
- Nelson D., Hervé-Mignucci M., Goggins A., Szambelan S. J., Vladeck T. et Zuckerman J. (2014), [Moving to a Low-Carbon Economy: The Impact of Policy Pathways on Fossil Fuel Asset Values](#), Climate Policy Initiative, coll. « CPI Energy Transition Series ».
- NGFS (2020), « [Guide to climate scenario analysis for central banks and supervisors](#) », Network for Greening the Financial System, juin.
- Papageorgiou C., Saam M. et Schulte P. (2017), « Substitution between clean and dirty energy inputs: A macroeconomic perspective », *The Review of Economics and Statistics*, vol. 99(2), mai, p. 281-290.
- Paun A., Knight Z. et Chan W. S. (2015), « [Stranded assets: what next?](#) », HSBC Global Research, avril.
- Rozenberg J., Vogt-Schilb A. et Hallegatte S. (2017), « [Instrument choice and stranded assets in the transition to clean capital](#) », Inter-American Development Bank Working Paper, n° IDB-WP-782, mars.

- Saygin D., Rieger J., Caldecott B., Wagner N. et Gielen D. (2019), « Power sector asset stranding effects of climate policies », *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, vol. 14(4), p. 1-26.
- SDES (2021), « [Bilan énergétique de la France pour 2019](#) », *Data Lab – Énergie*, janvier.
- Semieniuk G., Holden P. B., Mercure J. F., Salas P., Pollitt H., Jobson K., Vercoulen P., Chewpreecha U., Edwards N. R. et Viñuales J. E. (2022), « Stranded fossil-fuel assets translate to major losses for investors in advanced economies », *Nature Climate Change*, vol. 12, mai, p. 532-538.
- Stern D. I. (2009), *Interfuel Substitution: A Meta-Analysis*, rapport de recherche, juin.
- Stern N. et Stiglitz J. (2021), « [The social cost of carbon, risk, distribution, market failures: An alternative approach](#) », NBER Working Paper n° 28472, février.
- TCFD (2017), *Recommendations of the Task Force on Climate-related Financial Disclosure*, rapport final, Task Force on Climate-Related Financial Disclosures, juin.
- Thomä J., Fulton M., Ramirez L., Röttmer N. et Duran M. (2017), « [Changing colors. Adaptive capacity of companies in the context of a transition to a low-carbon economy](#) », 2 °C Investing Initiative, juillet.
- Timmer M. P., Dietzenbacher DE., Los B., Stehrer R. et de Vries G. J. (2015), « [An illustrated user guide to the World Input–Output Database: The case of global automotive production](#) », *Review of International Economics*, vol. 23(3), août, p. 575-605.
- van der Ploeg F. et Rezai A. (2021), « [Optimal carbon pricing in general equilibrium: Temperature caps and stranded assets in an extended annual DSGE model](#) », *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 110, octobre.
- van der Werf E. (2008), « [Production functions for climate policy modeling: An empirical analysis](#) », *Energy Economics*, vol. 30(6), novembre, p. 2964-2979.
- Wang J. (2022), « [Waiting or acting: The effects of climate policy uncertainty](#) », Job Market Paper, septembre.





Directeur de la publication

**Gilles de Margerie, commissaire général**

Directeur de la rédaction

**Cédric Audenis, commissaire général adjoint**

Secrétaires de rédaction

**Gladys Caré, Olivier de Broca**

Contact presse

**Matthias Le Fur, directeur du service Édition/Communication/Événements**

**01 42 75 61 37, [matthias.lefur@strategie.gouv.fr](mailto:matthias.lefur@strategie.gouv.fr)**





RETROUVEZ LES DERNIÈRES ACTUALITÉS  
DE FRANCE STRATÉGIE SUR :



[www.strategie.gouv.fr](http://www.strategie.gouv.fr)



[@strategie\\_Gouv](https://twitter.com/strategie_Gouv)



[france-strategie](https://www.linkedin.com/company/france-strategie)



[francestrategie](https://www.facebook.com/francestrategie)



[@FranceStrategie\\_](https://www.instagram.com/FranceStrategie_)



[StrategieGouv](https://www.youtube.com/StrategieGouv)

Les opinions exprimées dans ce rapport engagent leurs auteurs et n'ont pas vocation à refléter la position du gouvernement



**RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE**

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*



**FRANCE STRATÉGIE**  
ÉVALUER. ANTICIPER. DÉBATTRE. PROPOSER.

Institution autonome placée auprès de la Première ministre, France Stratégie contribue à l'action publique par ses analyses et ses propositions. Elle anime le débat public et éclaire les choix collectifs sur les enjeux sociaux, économiques et environnementaux. Elle produit également des évaluations de politiques publiques à la demande du gouvernement. Les résultats de ses travaux s'adressent aux pouvoirs publics, à la société civile et aux citoyens.