

En chemin vers la neutralité carbone. Mais quel chemin ?

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

Annexe en ligne

S1. Programme récursif de maximisation avec expression des contraintes

Afin d'analyser les propriétés théoriques du programme d'optimisation, le programme est réécrit de façon récursive.

S1.1. Présentation du programme

Les variables d'état sont : $(\tilde{K}_{t-1}^b, K_{t-1}^v, E_{t-1})$. Les variables de contrôle à chaque date sont : (I_t^b, I_t^v, ϕ_t^b) .

Le programme s'écrit de façon récursive en considérant toutes les contraintes¹ :

$$V(\tilde{K}_{t-1}^b, K_{t-1}^v, E_{t-1}) = \max_{I_t^b, I_t^v, \phi_t^b} u(F(\tilde{K}_{t-1}^b(1 - \phi_t^b) + \underline{K}^b, K_{t-1}^v) - I_t^b - I_t^v) + \frac{1}{1 + \rho} V(\tilde{K}_t^b, K_t^v, E_t),$$

sous contraintes :

$$\begin{cases} I_t^b \geq 0 & (\gamma_t^b) \\ I_t^v \geq 0 & (\gamma_t^v) \\ \phi_t^b \geq 0 & (\alpha_t) \\ \phi_t^b \leq 1 & (\beta_t) \\ e_t = e_b \tilde{K}_{t-1}^b(1 - \phi_t^b) \leq \min(\bar{E}_t, BC - E_{t-1}) & (\mu_t) \\ K_t^b = \tilde{K}_{t-1}^b(1 - \phi_t^b)(1 - \delta) + I_t^b \\ K_t^v = K_{t-1}^v(1 - \delta) + I_t^v \\ E_t = E_{t-1} + e_b \tilde{K}_{t-1}^b(1 - \phi_t^b) \end{cases}$$

On peut intégrer les contraintes directement dans le programme en réécrivant le lagrangien $\mathcal{L}(\tilde{K}_{t-1}^b, K_{t-1}^v, E_{t-1})$ de façon récursive de la façon suivante :

$$\mathcal{L}(\tilde{K}_{t-1}^b, K_{t-1}^v, E_{t-1}) = \min_{\gamma_t^b, \gamma_t^v, \alpha_t, \beta_t, \mu_t \geq 0} \max_{I_t^b, I_t^v, \phi_t^b} \begin{cases} u(F(\tilde{K}_{t-1}^b(1 - \phi_t^b) + \underline{K}^b, K_{t-1}^v) - I_t^b - I_t^v) + \frac{1}{1 + \rho} \mathcal{L}(\tilde{K}_t^b, K_t^v, E_t) \\ + \gamma_t^b I_t^b + \gamma_t^v I_t^v \\ + \alpha_t \phi_t^b + \beta_t(1 - \phi_t^b) \\ + \mu_t (\min(\bar{E}_t, BC - E_{t-1}) - e_b (\tilde{K}_{t-1}^b(1 - \phi_t^b))) \end{cases},$$

sous contraintes :

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

¹ Dans les développements suivants, on désigne par capital brun le capital brun non résiduel.

En chemin vers la neutralité carbone. Mais quel chemin ?

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

Annexe en ligne

Les équations d'Euler s'expriment en dérivant le Lagrangien par rapport aux variables d'état :

$$\begin{cases} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \bar{K}_{t-1}^b} = (1 - \varphi_t) \left[u'(C_t) \frac{\partial F}{\partial K_t^b} - \mu_t e_b + \frac{1 - \delta}{1 + \rho} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial K_t^b} + \frac{e_b}{1 + \rho} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial E_t} \right] \\ \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial K_{t-1}^v} = u'(C_t) \frac{\partial F}{\partial K_t^v} + \frac{1 - \delta}{1 + \rho} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial K_t^v} \\ \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial E_{t-1}} = -\mu_t 1\{BC - E_{t-1} < \bar{E}_t\} + \frac{1}{1 + \rho} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial E_t} \end{cases}$$

où $\frac{\partial F}{\partial K_t^b} = \frac{\partial F}{\partial K^b}(K_{t-1}^b(1 - \varphi_t^b), K_{t-1}^v)$. Par ailleurs, les conditions de premier ordre par rapport aux variables de contrôle amènent :

$$\begin{cases} u'(C_t) = \gamma_t^b + \frac{1}{1 + \rho} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial K_t^b} \\ u'(C_t) = \gamma_t^v + \frac{1}{1 + \rho} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial K_t^v} \\ \alpha_t - \beta_t = \left[u'(C_t) \frac{\partial F}{\partial K_t^b} - \mu_t e_b + \frac{1 - \delta}{1 + \rho} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial K_t^b} + \frac{e_b}{1 + \rho} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial E_t} \right] K_{t-1}^b \end{cases}$$

L'analyse économique du problème conduit à exclure les cas où l'investissement vert est nul (notamment en présence de la contrainte environnementale et dans le cas d'une fonction de production CES). Donc $\gamma_t^v = 0$, et

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial K_{t-1}^v} = \frac{1}{1 + \rho} \left(\frac{\partial F}{\partial K^v} + 1 - \delta \right) \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial K_t^v}.$$

Les équations portant sur les dérivées du Lagrangien par rapport aux différentes variables de contrôle indiquent comment les contraintes se transmettent d'une période à l'autre. La contrainte budget carbone conduit ainsi à déprécier le Lagrangien par rapport au capital brun, même lorsque la contrainte portant sur les émissions carbone n'est pas saturée ($\mu_t = 0$).

S1.2. Caractérisation de l'état stationnaire en présence de contraintes carbone

On suppose l'existence d'un état stationnaire de l'économie, telle que les différentes grandeurs du modèle prennent les mêmes valeurs. Les conditions d'existence et de convergence vers l'état stationnaire sont vérifiées dans le cadre standard lorsque les fonctions d'utilité et de production sont concaves (cf. Mercenier & Michel, 1994).

À l'état stationnaire sans contrainte carbone, investissements brun et vert coexistent, tels que les conditions de premier ordre sont vérifiées :

$$u'(C_0) = \frac{1}{1 + \rho} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial K_0^b} = \frac{1}{1 + \rho} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial K_0^v}.$$

En chemin vers la neutralité carbone. Mais quel chemin ?

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

Annexe en ligne

D'après les équations d'Euler, écrites à leur situation stationnaire, on obtient, sans contrainte carbone :

$$\begin{cases} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \tilde{K}_0^b} = u'(C_0) \frac{\partial F}{\partial K_0^b} + \frac{1-\delta}{1+\rho} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial K_0^b} \\ \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial K_0^v} = u'(C_0) \frac{\partial F}{\partial K_0^v} + \frac{1-\delta}{1+\rho} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial K_0^v} \end{cases}$$

ce qui amène :

$$\frac{\partial F}{\partial K^b}(\tilde{K}_0^b + \underline{K}^b, K_0^v) = \frac{\partial F}{\partial K^v}(\tilde{K}_0^b + \underline{K}^b, K_0^v) = \rho + \delta.$$

Ces deux équations définissent les niveaux de capital vert et brun à leur état stationnaire sans contrainte. Les niveaux d'investissement se déduisent des équations de flux : $I_0^j = K_0^j / \delta$, $j = v, b$, et la consommation se déduit :

$$C_0 = u'^{-1} \left(F(\tilde{K}_0^b + \underline{K}^b, K_0^v) - \delta(I_0^b + I_0^v) \right).$$

À l'état stationnaire en présence de contraintes carbone, il ne peut y avoir d'investissement brun ou de capital brun, sinon les émissions croîtraient sans limite, donc $I_\infty^b = 0$ et $K_\infty^b = \underline{K}_b$, le capital brun résiduel. La saturation de la contrainte sur l'investissement brun implique donc $\gamma_\infty^b = u'(C_\infty)$.

Il n'y a donc que de l'investissement vert. Son niveau est défini par l'équation d'Euler relative au capital vert et la condition du premier ordre portant sur l'investissement vert :

$$\begin{cases} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial K_\infty^v} = u'(C_\infty) \frac{\partial F}{\partial K_\infty^v} + \frac{1-\delta}{1+\rho} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial K_\infty^v} \\ u'(C_\infty) = \frac{1}{1+\rho} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial K_\infty^v} \end{cases}$$

ce qui amène :

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

Cette équation permet d'en déduire la valeur du capital vert à l'équilibre stationnaire en l'absence de capital brun non résiduel.

À l'état stationnaire, le niveau d'investissement vert ne sert qu'à compenser la dépréciation du capital et est donné par $I_\infty^b = \delta K_\infty^v$. Enfin, le niveau de consommation se déduit de la contrainte de production $C_\infty = F(0, K_\infty^v) - \delta K_\infty^v$.

On peut alors en déduire la valorisation marginale du capital vert dans l'économie : $\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial K_\infty^v} = (1+\rho)u'(C_\infty)$.

L'absence de capital brun rend les contraintes sur le niveau d'échouage inopérantes, laissant la valeur de φ_∞^b indéterminée. Pour que l'équation d'Euler portant sur le capital brun soit vérifiée, il faut donc $\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial K_\infty^b} = 0$ et

$$u'(C_\infty) \frac{\partial F}{\partial K_\infty^b} - \mu_\infty e_b + \frac{e_b}{1+\rho} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial E_\infty} = 0.$$

En chemin vers la neutralité carbone. Mais quel chemin ?

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

Annexe en ligne

Or la stationnarité de l'équation d'Euler portant sur les émissions carbone implique :

$$\frac{\partial L}{\partial E_\infty} = -\mu_\infty + \frac{1}{1+\rho} \frac{\partial L}{\partial E_\infty},$$

ce qui amène à $\frac{\partial L}{\partial E_\infty} = -\left(\frac{1+\rho}{\rho}\right)\mu_\infty$.

Finalement, on en déduit la valeur de la contrainte d'émissions à l'état stationnaire :

$$\mu_\infty = \frac{u'(C_\infty)}{e_b} \frac{\rho}{1+\rho} \frac{\partial F}{\partial K_b}.$$

Dans le cas où il n'y a pas de contrainte sur le budget carbone, mais seulement l'obligation ZEN à partir d'une date donnée, l'équilibre n'est modifié que sur le calcul de la valorisation de la contrainte d'émission : le terme lié à l'accumulation des émissions n'apparaît alors plus dans l'équation et on obtient

$$u'(C_\infty) \frac{\partial F}{\partial K_b} - \mu_\infty e_b = 0.$$

Ce qui amène

$$\mu_\infty = \frac{u'(C_\infty)}{e_b} \frac{\partial F}{\partial K_b}.$$

De fait, considérer que les contraintes portant sur les émissions sont liées à l'obligation ZEN ou bien au budget carbone (lorsqu'elles sont confondues) ne fait que modifier la définition de μ_t . Les variables de contrôle décrivant l'évolution des grandeurs économiques sont inchangées par ce choix.

S2. Résolution numérique du modèle

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

Dans ce cadre, le programme du planificateur, appliqué au cas où n'existe qu'une seule forme de capital, s'étend sur une séquence de moments finis $t(1), \dots, t(N)$, avec $N \rightarrow +\infty$:

$$\begin{cases} \max_{0 \leq i_{t(1)}, \dots, i_{t(N-1)} \leq 1} \sum_{n=1}^{N-1} \alpha_n u\left((1 - i_{t(n)})F(K_{t(n)})\right) + \frac{\alpha_{N-1}}{\rho} u\left(F(K_{t(N)}) - \delta K_{t(N)}\right) \\ \text{s.c. } K_{t(n+1)} - K_{t(n)} = \Delta_n \left(-\delta K_{t(n)} + i_{t(n)}F(K_{t(n)})\right) \end{cases}$$

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

Mercenier & Michel (1994) proposent 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.

Pour l'application numérique, l'écriture du critère ci-dessus est adaptée pour introduire les deux types d'investissement et la part de capital brun échoué à chaque date comme variables de contrôle. Dans l'estimation de base, il s'agit de maximiser le critère par rapport à 15 variables : 27 variables correspondant au choix d'investissement brun (de 2023 à 2050, puisque après 2050, le niveau d'investissement est nul de part la contrainte ZEN), 97 variables correspondant au choix d'investissement vert (de 2023 à 2120) et 27 variables correspondant à la part de capital échoué (de 2023 à 2050). La nature du programme d'optimisation fait que les variables correspondant à l'investissement brun et à l'échouage sont aux bornes des intervalles de variation. Nous utilisons donc l'algorithme d'optimisation L-BFGS-B (implémenté dans la routine `optim` de R) adapté lorsque les contraintes appliquées sur les variables sont simples, ce qui est le cas de celles portant sur l'investissement ou l'échouage. Toutefois, des contraintes plus complexes portant sur les émissions carbone sont également introduites dans le modèle, pouvant affecter la recherche de solutions optimisant le critère retenu.

Pour traiter ces difficultés, nous avons appliqué deux stratégies. D'une part nous avons considéré le lagrangien du problème de maximisation pour la seule contrainte budget carbone, ce qui conduit à modifier le programme de la façon suivante :

$$\begin{cases} \max_{\substack{i_1^b, \dots, i_{T_E}^b \geq 0 \\ \phi_1^b, \dots, \phi_{T_E}^b \geq 0 \\ l_1^v, \dots, l_T^v \geq 0}} \sum_{t=t_0}^{+\infty} \frac{u(C_t)}{(1 + \rho)^{t-t_0}} + \lambda \left(BC - \sum_{t=1}^{T_E-1} e_t \right) \end{cases}$$

En chemin vers la neutralité carbone. Mais quel chemin ?

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

Annexe en ligne

λ est alors un prix (exprimé en unité d'utilité) appliqué aux émissions, qui correspond, dans le modèle stationnaire exprimé dans la section précédente à la quantité $\frac{\partial L}{\partial E_0}$. Plus λ est élevé, plus la contrainte portant sur la somme des émissions est forte et plus le cumul final des émissions est faible (jusqu'à $T_E - 1$, puisque, après T_E la contrainte ZEN s'applique et il n'y a plus d'émissions). À λ donné, les valeurs des variables (investissement, échouage) sont estimées par optimisation du programme. La valeur de λ finalement retenue est celle pour laquelle la somme des émissions carbone correspond à la contrainte Budget carbone.

D'autre part, afin de se prémunir du risque que l'algorithme d'optimisation converge vers des minima locaux ne correspondant pas à la bonne solution, plusieurs tirages aléatoires des valeurs initiales sont tirés selon une loi uniforme dans les intervalles de variation de ces variables (soit dans $[0,1]^{151}$). La solution retenue est celle minimisant les solutions associées à chacune de ces valeurs initiales.

S3. Données complémentaires

Le choix d'une cible d'1,6 °C pour les simulations, plutôt que 1,5 °C dans la version la plus ambitieuse de l'accord de Paris, a été fait pour faciliter la résolution numérique du modèle, en allouant au planificateur social un budget carbone plus grand, de 3,93 GtCO₂eq, plutôt que de seulement 2,17.

Tableau S3-1 – Budget carbone pour le monde et la France selon la cible de réchauffement visée (GtCO₂eq)

	Cible de réchauffement visée						
	1,5 °C	1,6 °C	1,65 °C	1,7 °C	1,75 °C	1,8 °C	2 °C
Monde	247	447	531	615	708	802	1 219
France	2,17	3,93	4,67	5,41	6,23	7,05	10,71

Note : les budgets carbone monde correspondant à 1,65 °C et 1,75 °C ne sont pas fournis dans Lamboll *et al.* (2023), ils sont obtenus comme la moyenne des budgets carbone monde 1,6 °C et 1,7 °C, et 1,7 °C et 1,8 °C respectivement. La part de la France dans la population mondiale, de 0,88 %, détermine la part du budget monde alloué à la France.

Source : Lamboll *et al.* (2023) ; calculs des auteurs.

S4. Analyse de sensibilité des résultats au calibrage

Les simulations se fondent sur l'utilisation de paramètres calibrés, dont les valeurs sont tirées d'autres publications, ou bien estimées selon des hypothèses, nécessaires, mais simplificatrices. Une analyse de sensibilité permet de mesurer l'incidence du choix des paramètres initiaux sur les principaux résultats du modèle. Il est pertinent de l'appliquer à l'ensemble des paramètres de calibrage, statiques et dynamiques (la part initiale du capital brun dans le capital total, le taux de dépréciation du capital (δ), l'élasticité de substitution entre capital brun et capital vert (σ), la taille du puits et le taux d'actualisation (ρ)) et de la décliner par scénario. Sont distingués ici les paramètres les plus « basiques » du modèle, dans le sens où les autres s'en déduisent. Ainsi, les productivités du capital brun et vert dans la fonction de production CES se déduisent de ces paramètres de base. Pour chacune des simulations sont représentées l'évolution de la consommation ainsi que certaines variables résumant la dynamique de remplacement du capital brun par le capital vert : le cumul des investissements bruns, celui des investissements verts, la date du dernier investissement brun et le cumul du capital brun échoué (en proportion du PIB de 2019). Pour chaque jeu de paramètres, les simulations sont conduites pour les 4 différents scénarios présentés en première partie des résultats : le scénario ZEN 2050 (zéro émission nette à partir de 2050), ZEN + *Fit for 55* (limitation des émissions nettes à partir de l'année 2030), ZEN + *Fit for 55* + baisse des émissions nettes de 90 % en 2040, et respect d'un budget carbone de 3,93 GtCO₂eq correspondant à une cible de réchauffement de 1,6 °C.

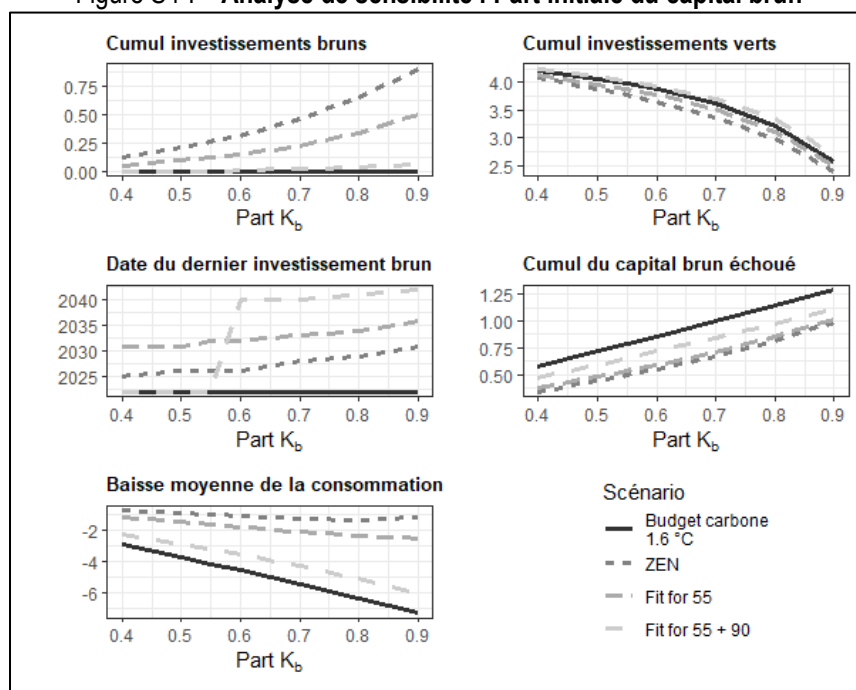
En chemin vers la neutralité carbone. Mais quel chemin ?

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

Annexe en ligne

S4.1. Part initiale du capital brun

Figure S4-I – Analyse de sensibilité : Part initiale du capital brun



Le cumul du capital échoué sur toute la période s'avère très sensible à la proportion de capital brun présent au départ. En doublant cette part, on double en même temps le montant de l'échouage dans le scénario de budget carbone (figure S4.I). Il passe ainsi de 70 % du PIB 2019 à 140 %, lorsque la part du capital brun passe de 40 à 80 % du capital total (l'hypothèse centrale étant à 55 %). Donc plus il y a de capital brun en 2019 et plus la transition est coûteuse : renoncer à l'investissement brun ne suffit pas, il faut aussi jeter davantage de capital émissif. La part du brun induit également un effet, paradoxal, sur le profil des chroniques d'investissements : plus elle est forte, et plus l'investissement brun s'arrête tardivement et son montant cumulé augmente. Cela s'explique par la façon dont le modèle est calibré initialement. La plupart des paramètres le sont à partir de données exogènes, sauf a_b , a_v et e_b , qui sont déduits des valeurs initiales des variables endogènes et des autres paramètres. Par conséquent, plus la part du capital brun est forte en 2019, 1) plus l'émissivité de ce même capital est faible, car le flux d'émissions de départ reste, lui, inchangé ; et 2) plus le capital brun est productif par rapport au capital vert. Et plus le planificateur social investit dans le capital brun tardivement.

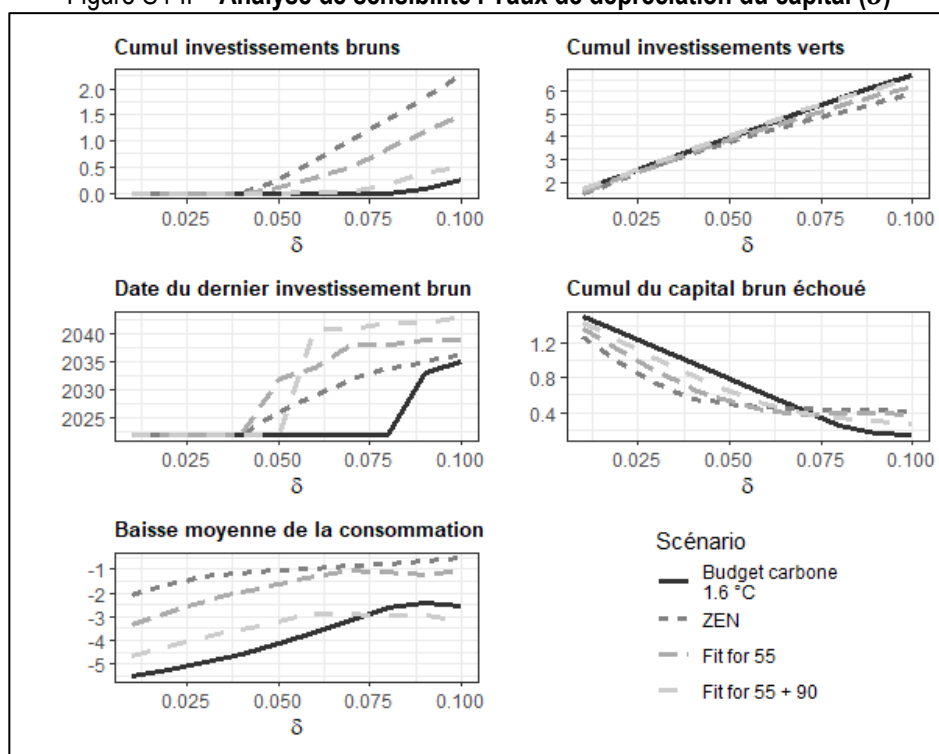
En chemin vers la neutralité carbone. Mais quel chemin ?

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

Annexe en ligne

S4.2. Taux de dépréciation du capital

Figure S4-II – Analyse de sensibilité : Taux de dépréciation du capital (δ)



La valeur du taux de dépréciation joue un rôle important, à la fois sur la chronologie des investissements et le montant de capital brun échoué. En effet, plus le capital se déprécie vite, 1) plus il faut investir pour maintenir l'outil de production : les investissements verts et bruns augmentent avec δ ; 2) moins il est nécessaire d'échouer du capital brun pour réduire les émissions, puisqu'il se déprécie naturellement rapidement. Il peut même devenir possible d'investir durablement dans le capital brun, même dans le scénario de respect d'un budget carbone, avec une dépréciation très élevée (figure S4-II).

Un modèle plus granulaire pourrait inclure une hétérogénéité du taux de dépréciation. Cela permettrait de différencier les conclusions sur le rythme optimal de transition selon les secteurs et activités, en fonction des durées de vie des biens capitaux. Il apparaît ainsi important de verdir avant tout le capital à longue durée de vie.

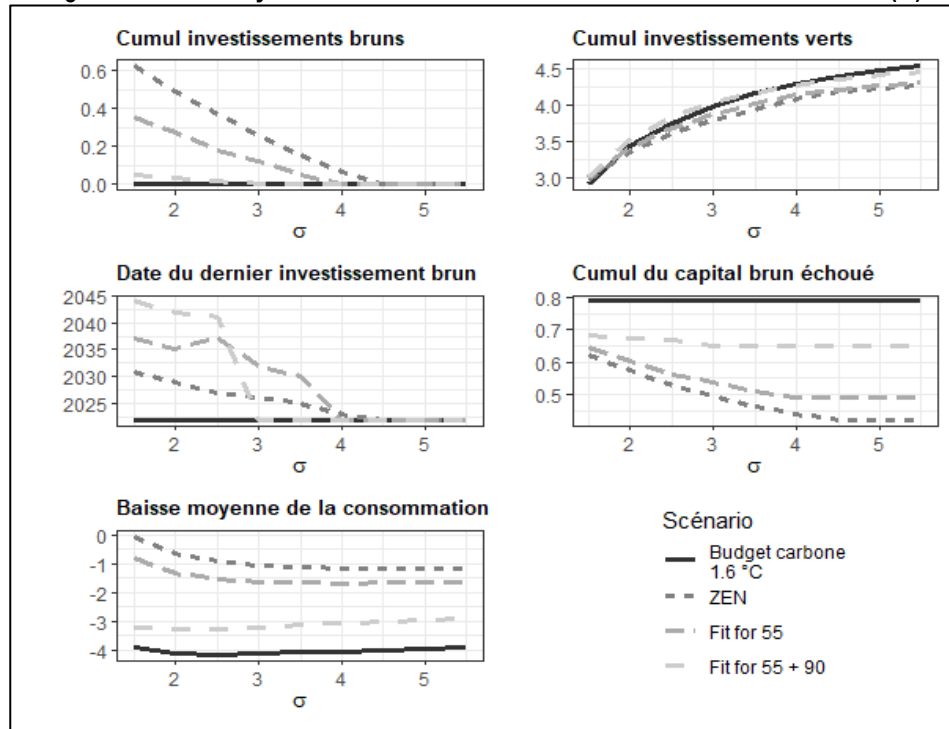
En chemin vers la neutralité carbone. Mais quel chemin ?

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

Annexe en ligne

S4.3 Élasticité de substitution

Figure S4-III – Analyse de sensibilité : élasticité de substitution brun / vert (σ)



La transition apparaît comme d'autant plus facile que les capitaux bruns et verts sont interchangeables, c'est-à-dire que l'élasticité de substitution entre brun et vert est forte. Quand σ croît, le cumul de l'investissement brun diminue et la date de son abandon est plus précoce. L'investissement vert est stimulé par la plus grande substituabilité entre les deux formes de capital. Comme les investissements bruns sont plus faibles, il y a également moins de capital échoué. Cette accélération de la transition est due à ce que l'écart de productivité entre brun et vert est fonction décroissante de l'élasticité : donc plus celle-ci est forte, et plus la performance relative du vert par rapport au brun s'améliore. Quand les deux types de capitaux sont très peu substituables, il est très coûteux en PIB de décarboner l'économie : le PIB à l'état stationnaire est plus faible que quand ces capitaux sont très substituables. Si la consommation est plus élevée en moyenne sur la période 2023-2050 pour des valeurs plus faibles de sigma, elle est en revanche plus faible à l'état stationnaire.

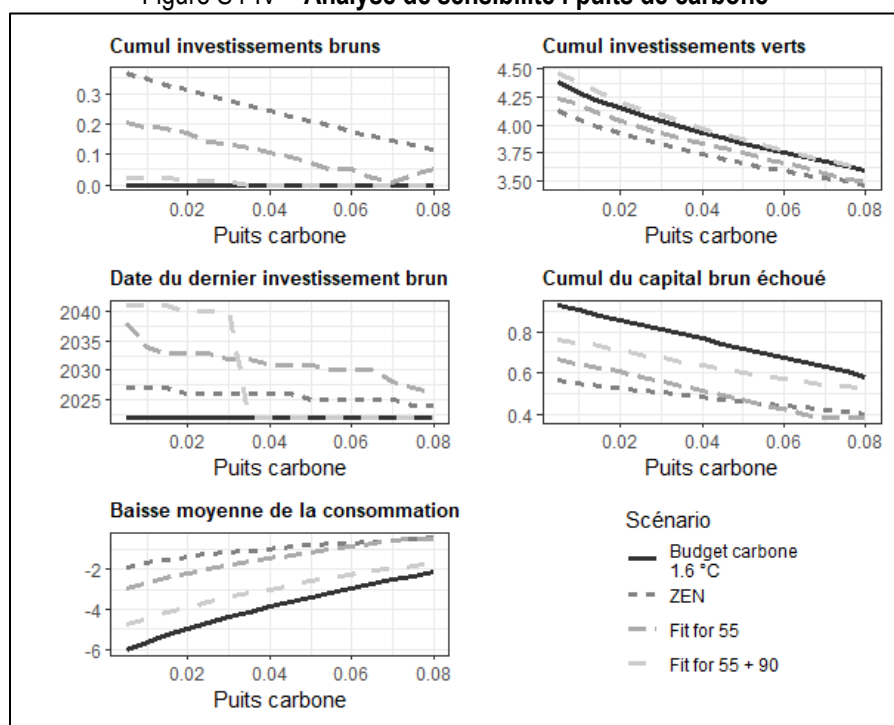
En chemin vers la neutralité carbone. Mais quel chemin ?

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

Annexe en ligne

S4.4. Puits de carbone

Figure S4-IV – Analyse de sensibilité : puits de carbone



Quant au puits de carbone, quand il croît, l'objectif ZEN devient plus facile à atteindre, et le cumul des investissements verts diminue (figure S4-IV). De même, l'investissement brun disparaît plus rapidement, car il correspond au surplus d'investissement au-delà de ce qui est nécessaire pour remplacer le capital résiduel. La taille du puits affecte également le montant des actifs échoués, notamment pour la gestion du budget carbone. En effet, à émissions brutes données, un puits plus important réduit le niveau des émissions nettes et facilite le respect du budget carbone, qui est un objectif exprimé en net. En conséquence, il devient moins dur de réduire le stock de capital à son niveau résiduel, et moins d'échouage est nécessaire pour y arriver.

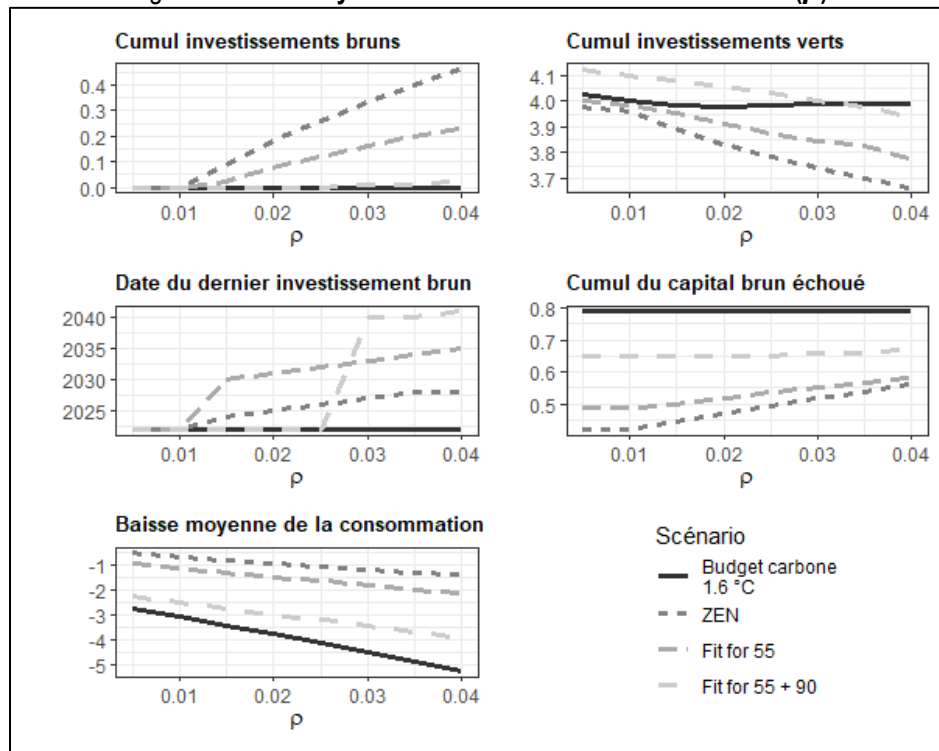
En chemin vers la neutralité carbone. Mais quel chemin ?

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

Annexe en ligne

S4.5. Taux d'actualisation

Figure S4-V – Analyse de sensibilité : Taux d'actualisation (ρ)



La hausse du taux d'actualisation ρ entraîne une augmentation des investissements bruns et un recul des investissements verts (figure S4-V). En effet, ce taux représente un arbitrage entre le présent et l'avenir, une valeur plus élevée de ρ étant associée à une préférence plus forte pour le présent. Avec une préférence plus forte pour le présent, les générations vivant en fin de période sont moins valorisées que celles vivant en début de période : à long terme, l'épargne est plus basse, donc le PIB et la consommation sont plus faibles à l'état stationnaire. Dans le scénario budget carbone, en échange d'une consommation plus soutenue en début de période, la consommation baisse plus fortement en fin de période, ainsi qu'en moyenne sur toute la période.

S5. Revue de littérature

De nombreux modèles macroéconomiques s'intéressent à la transition énergétique. Le plus célèbre, DICE (Barrage & Nordhaus (2023) dans sa version la plus récente), de niveau mondial, produit à la fois une cible climatique (un réchauffement « optimal », au sens de l'analyse coûts-bénéfices ou coûts-dommages) et un sentier de prix du carbone pour y parvenir. Son approche est dite « intégrée » car il contient une boucle de rétroaction entre économie et climat : les activités humaines produisent des émissions de GES, dont la concentration augmente dans l'atmosphère, ce qui réchauffe la température moyenne et cause des dommages dont une partie est mesurable économiquement. L'évaluation des dommages effectuée dans les modèles intégrés fait l'objet de nombreuses critiques, en particulier sur la non prise en compte des points de bascule climatiques, qui pourraient entraîner des effets non linéaires sur le PIB, et non prévisible à partir des variations climatiques passées ou présentes. D'où un risque important de sous-estimation (Stern *et al.*, 2021). Ainsi, Barrage & Nordhaus (2023) prédit une baisse de PIB de 12,5 % seulement en cas de hausse de la température moyenne globale de 6 °C, soit un changement radical de

En chemin vers la neutralité carbone. Mais quel chemin ?

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

Annexe en ligne

climat. Cette approche intégrée n'est du reste pas pertinente pour un modèle français, en raison du faible poids de la France dans les émissions mondiales (moins de 1 %) : en effet, la concentration atmosphérique en GES est insuffisamment sensible aux efforts d'atténuation nationaux. En outre, l'analyse coûts-bénéfices menée dans ce type de modèle endogénéise la cible climatique. Or depuis l'accord de Paris il paraît plus fondé de considérer celle-ci comme exogène, car non seulement le plafonnement du réchauffement à 1,5 °C (2 °C maximum) correspond à un consensus scientifique mais il fait désormais l'objet d'un engagement politique au niveau international.

En France, deux modèles régulièrement mobilisés pour l'évaluation macroéconomique de la SNBC, ThreeME (Reynès *et al.*, 2021) et IMACLIM-R-France (Bibas *et al.*, 2022), proposent une désagrégation sectorielle poussée de l'économie française. Leur caractère détaillé permet d'évaluer un large éventail de mesures de transition : réglementations, taxe carbone, investissements verts, décarbonation du bouquet énergétique, etc. Ces modèles s'appuient sur de nombreuses hypothèses : sur les comportements des ménages et des entreprises, mais aussi sur l'ajustement de l'offre et de la demande sur les marchés, ou encore la valeur des multiplicateurs budgétaires. La compréhension et l'analyse des résultats qui en sont issus s'avèrent parfois délicates, car il peut être difficile de mesurer le rôle respectif de chaque hypothèse. En outre, leur résolution se fait de manière statique, à chaque date, sans tenir compte de l'effet des anticipations sur les mécanismes de la transition. Les difficultés liées à l'utilisation et à la compréhension des résultats de ces modèles incitent à recourir, de façon complémentaire, à des modèles stylisés, à l'interprétation plus simple².

Notre travail reprend un cadre de modélisation connu. Concernant la fonction de production, déjà dans Acemoglu *et al.* (2012), deux formes de capital, un brun et un vert (le premier émissif, pas le second), sont combinées dans le secteur productif. Mais contrairement à notre modèle les auteurs introduisent un progrès technique endogène. Leurs résultats montrent que la taxation du brun et les subventions au vert permettent d'orienter le progrès technique vers celui-ci. La conséquence en est une baisse de la productivité globale à court terme, du fait du retard technologique du vert sur le brun. Dans ce contexte, il devient rentable d'engager la transition énergétique au plus vite : plus elle est précoce, plus la différence de productivité entre les deux technologies est faible et le retard vite rattrapé. Ce type de modélisation a été repris par Rozenberg *et al.* (2020), qui y ajoutent la possibilité de sous-utiliser le capital brun sous l'effet des contraintes climatiques, ce qui revient à l'échouer si ces contraintes sont permanentes. Leur étude compare les performances respectives d'une série d'instruments (taxe carbone optimale, taxe carbone progressive, réglementation, subventions) et fait apparaître l'existence d'un arbitrage entre maximisation du bien-être intertemporel (garantie par la taxe carbone) et faisabilité politique d'un sentier de décarbonation (mieux assurée par des politiques de second rang, qui ont pour avantage de limiter la sous-utilisation du capital brun et donc les pertes essuyées par ses propriétaires)³.

La littérature macroéconomique récente représente l'échouage du capital de deux façons. Elle peut le faire de manière exogène, en s'appuyant sur des chroniques d'actifs échoués estimées hors modèle. C'est le cas par exemple d'une évaluation menée à partir de ThreeME (à paraître), sur les conséquences économiques d'un scénario de transition retardée à 2030, qui s'appuie sur les estimations d'échouage du capital au niveau mondial par l'IRENA (IRENA, 2017), après estimation de la part de la France. Sur cette base, des chroniques d'investissements négatifs

² Germain & Lellouch (2020) adopte cette approche et s'appuie sur un modèle stylisé pour évaluer les trajectoires optimales de réduction des émissions dans le cadre d'un modèle d'optimisation intertemporelle à partir d'hypothèses plus générales sur les technologies de décarbonation. Notre approche complète la leur en mettant l'accent sur les transformations du capital productif et les perspectives d'échouage du capital émissif.

³ Il existe également une littérature qui présente un cadre de modélisation apparenté au nôtre, et étudie l'ordre dans lequel différentes ressources, fossiles et renouvelables, sont mobilisées en cas de contrainte sur les émissions (Chakravorty *et al.*, 2006). Ces travaux aboutissent à des chroniques d'extraction optimales de ressources disponibles en quantités limitées. Dans la lutte contre le réchauffement climatique, la contrainte n'est pas sur la rareté de la ressource, car une partie des ressources fossiles doit être laissée dans le sol pour respecter les objectifs climatiques. Mais notre analyse se rapproche malgré tout de ces travaux, dans la mesure où le budget carbone renseigne implicitement sur un stock maximal de ressources fossiles qu'il est possible d'extraire. En considérant les ressources fossiles comme un capital naturel, la partie qui ne doit pas être extraite représente alors des actifs échoués.

En chemin vers la neutralité carbone. Mais quel chemin ?

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

Annexe en ligne

ont été introduites et leurs conséquences économiques évaluées. Mais l'échouage d'actifs peut également être endogène : dans ce cas il est le résultat d'un calcul rationnel face à une nouvelle contrainte. Dans le modèle d'inspiration néo-keynésienne de Jackson (2020), le niveau de capital à un moment donné dépend des décisions passées. L'introduction d'une contrainte sur les émissions peut faire baisser la quantité optimale de capital brun à utiliser sous celle détenue. Dans ce cas, le niveau de capital échoué se mesure à son sous-emploi. Dans un cadre différent, c'est aussi l'idée de Rozenberg *et al.* (2020) : si à long terme la décarbonation se fait par l'investissement dans le vert, à court terme elle passe aussi par une sous-utilisation du brun. Comme eux, nous reprenons cette idée d'endogénéité de la décision d'échouage : mais à leur différence, quand le capital brun est échoué, nous considérons qu'il est tout simplement mis au rebut (comme cela pourrait être le cas à l'avenir de centrales à charbon, de véhicules thermiques ou de bâtiments à la rénovation énergétique trop coûteuse) et non seulement sous-employé.

Bibliographie

Acemoglu, D., Aghion, P., Bursztyn, L. & Hemous, D. (2012). The Environment and Directed Technical Change. *American Economic Review*, 102(1), 131–166. <https://doi.org/10.1257/aer.102.1.131>

Barrage, L. & Nordhaus, W. D. (2023). Policies, Projections, and the Social Cost of Carbon: Results from the DICE-2023 Model. NBER, *Working Paper* 31112. <https://doi.org/10.3386/w31112>

Bibas, R., Cassen, C., Crassous, R., Guivarch, C., Hamdi-Cherif, M., Hourcade, J. C., Leblanc, F., Méjean, A., Broin, E. Ó., Rozenberg, J., Sassi, O. & V, A. (2022). Impact Assessment of CLIMate policies with IMACLIM-R 1.1. Model documentation version 1.1. CIRED, *Working Papers* hal-03702627. <https://ideas.repec.org/p/hal/ciredw/hal-03702627.html>

Chakravorty, U., Magné, B. & Moreaux, M. (2006). A Hotelling model with a ceiling on the stock of pollution. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 30(12), 2875–2904. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jedc.2005.09.008>

Reynés F., Callonnec, G., Saussay, A., Landa, G., Malliet, P., Gueret, A., Hu, J., Hamdi-Cherif, M. & Gouédard, H. ThreeME Version 3 Multi-sector Macroeconomic Model for the Evaluation of Environmental and Energy polic: A full description. https://www.threeme.org/_files/ugd/e33ac5_0fb7e9f40b3e413f87bbc132822dc816.pdf

Germain, J.-M. & Lellouch, T. (2020). Coût social du réchauffement climatique et indicateurs de soutenabilité : les enseignements d'une application à la France. *Economie et Statistique / Economics and Statistics*, 517-518-519, 85–106. <https://doi.org/10.24187/ecostat.2020.517t.2024>

IRENA. (2017). *Renewable Energy Statistics 2017*. The International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. <https://www.irena.org/publications/2017/Jul/Renewable-Energy-Statistics-2017>

Jackson, A. (2020). *A stock-flow consistent framework for the analysis of stranded assets and the transition to a low carbon economy*. Thèse de doctorat, University of Surrey. <https://doi.org/10.15126/thesis.00850106>

Lamboll, R. D., Nicholls, Z. R. J., Smith, C. J., Kikstra, J. S., Byers, E. & Rogelj, J. (2023). Assessing the size and uncertainty of remaining carbon budgets. *Nature Climate Change*, 13(12), 1360–1367. <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01848-5>

Mercenier, J. & Michel, P. (1994). Discrete-Time Finite Horizon Approximation of Infinite Horizon Optimization Problems with Steady-State Invariance. *Econometrica*, 62(3), 635–656. <http://www.jstor.org/stable/2951661>

En chemin vers la neutralité carbone. Mais quel chemin ?

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

Annexe en ligne

Rozenberg, J., Vogt-Schilb, A. & Hallegatte, S. (2020). Instrument choice and stranded assets in the transition to clean capital. *Journal of Environmental Economics and Management*, 100, 102183.
<https://doi.org/10.1016/j.jeem.2018.10.005>

Stern, N., Stiglitz, J. E. & Taylor, C. (2021). The Economics of Immense Risk, Urgent Action and Radical Change: Towards New Approaches to the Economics of Climate Change. NBER, *Working Paper* 28472.
<https://doi.org/10.3386/w28472>