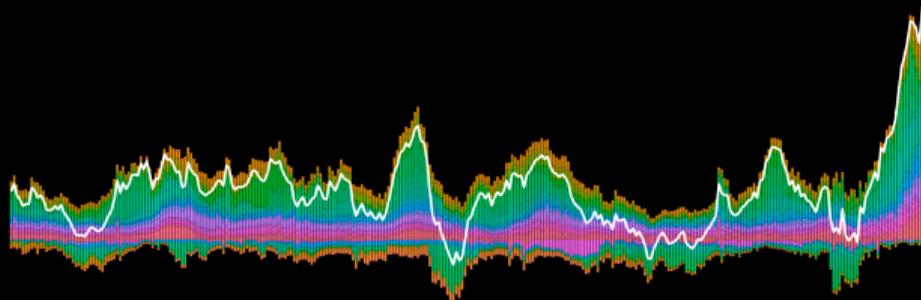


Dynare et la résolution des modèles RBC déterministes

Chapitre 3 - Macro x Climat



Novembre 2025



Le climat dans une coquille de noix

Concentration de GES dans l'atmosphère et pouvoir de réchauffement des GES

- La concentration de $CO_{2,eq}$ dans l'atmosphère a atteint 523 ppm en 2022 contre 508 ppm en 2021 selon l'OMM (source).
 - CO_2 : 423.9 ppm en 2024 +50% 1750
 - CH_4 : 1942 ppb en 2024, +164% depuis 1750
 - N_2O : 338 ppb + 24% depuis l'ère préindustrielle

Table 1 Durées de vie atmosphériques et PRG (GWP_{100}) de quelques GES.

Gaz à effet de serre (GES)	Formule	Durée de vie (ans)	GWP_{100}
Dioxyde de carbone	CO_2	[1 - 10^6]	1
Vapeur d'eau	H_2O	variable (très courte)	8
Méthane	CH_4	12.4	27.9
Protoxyde d'azote	N_2O	121	273
Tétrafluorométhane	CF_4	50 000	7 380
Hexafluorure de soufre	SF_6	3 200	25 200

Sources : GIEC AR6 (2021), WG1 ; INERIS/Ademe

Emissions de GES et dynamique atmosphérique

Dynamique des GES : avant l'ère industrielle, les flux naturels et anthropiques étaient équilibrés (climat stable). Depuis, les émissions dépassent les capacités d'absorption (changement climatique).

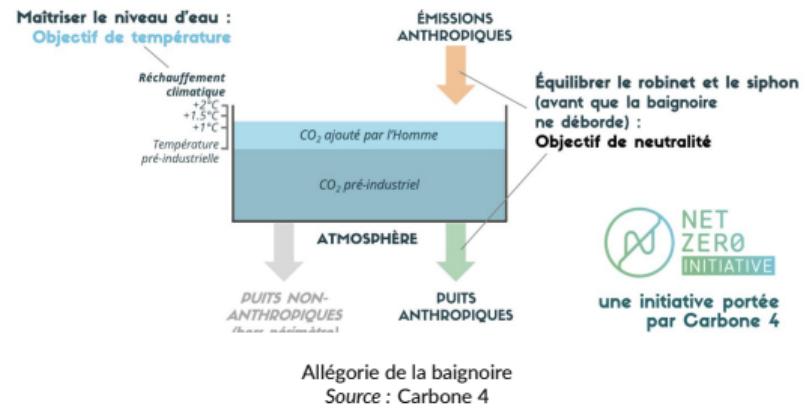
Modélisation (GHKT 2014, Bouter 2021) :

$$\begin{cases} S_t - \bar{S} = \sum_{s=0}^{t+T} (1 - d_s) CO_{2e,s} \\ (1 - d_s) = \psi_1 + (1 - \psi_1)\psi_2(1 - \psi_3)^s, \quad d_s \in [0, 1] \end{cases}$$

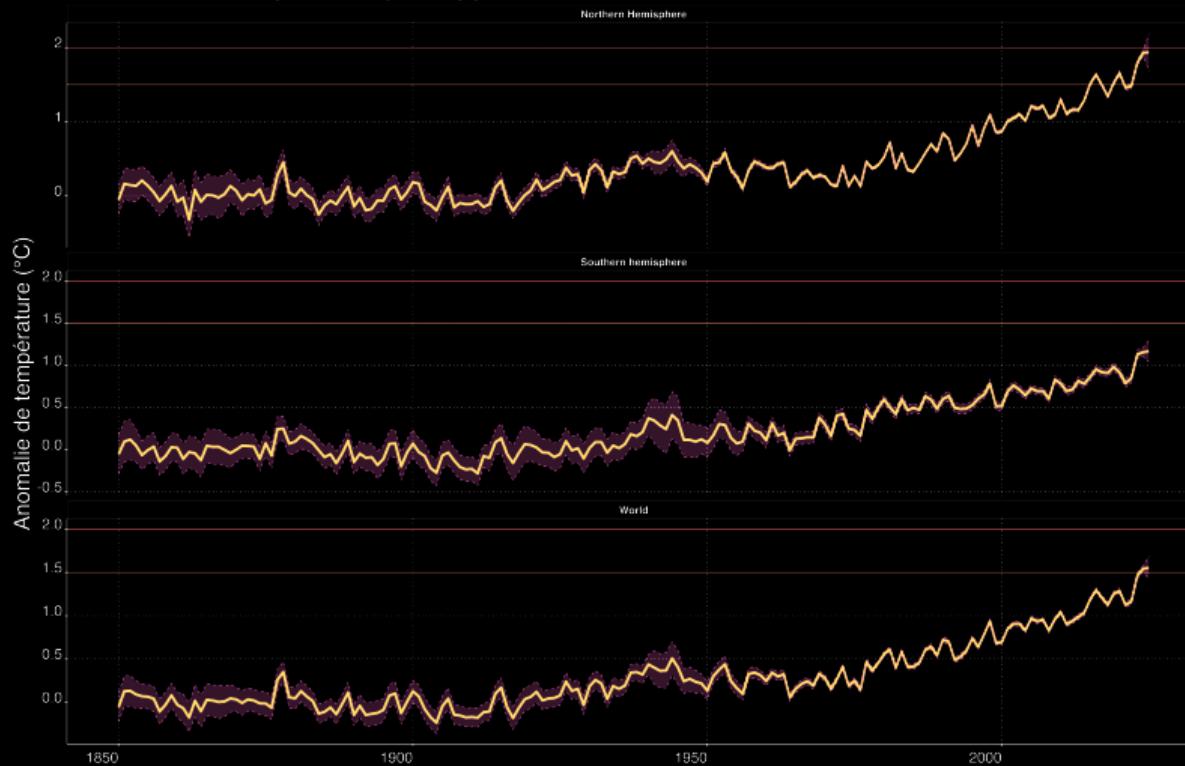
- ψ_1 : part de GES accumulée perpétuellement
 - $(1 - \psi_1)$: part qui disparaît immédiatement
 $1 - \psi_2$ ou lentement ψ_2 au taux (ψ_3)

$$\begin{cases} S_t = S_t^1 + S_t^2 \\ S_t^1 = \psi_1 CO_2 e, t + S_{t-1}^1 \\ S_t^2 = (1 - \psi_1) \psi_2 CO_2 e, t + (1 - \psi_3) S_{t-1}^2 \end{cases}$$

La neutralité carbone planétaire, une histoire de baignoire



Anomalie de température par rapport à 1860-1890 et intervalle de confiance à 95%

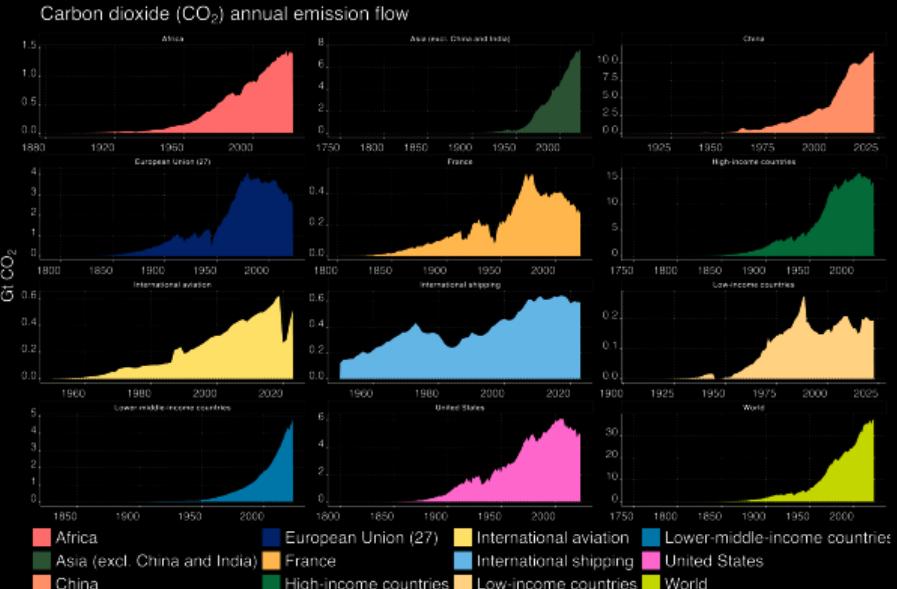


Émissions mondiales de CO₂ et moteurs

- En 2024, les émissions de CO₂ ont atteint 37.8 Gt (AIE), soit une hausse de +0,8% par rapport à 2023
- Elles sont principalement liées à :
 - l'utilisation de plus en plus intensive des énergies fossiles
 - la hausse générale du niveau de vie
 - la hausse de la population
 - la hausse de l'intensité énergétique du PIB

→ Comparaison internationale

- Les pays riches ont connu un pic d'émission
- Les pays en développement voient leurs émissions de GES augmenter
- Mais en niveau, ils sont responsables de la major partie des émissions



Flux annuel d'émission de CO₂ par région / pays
Source : Our world in data

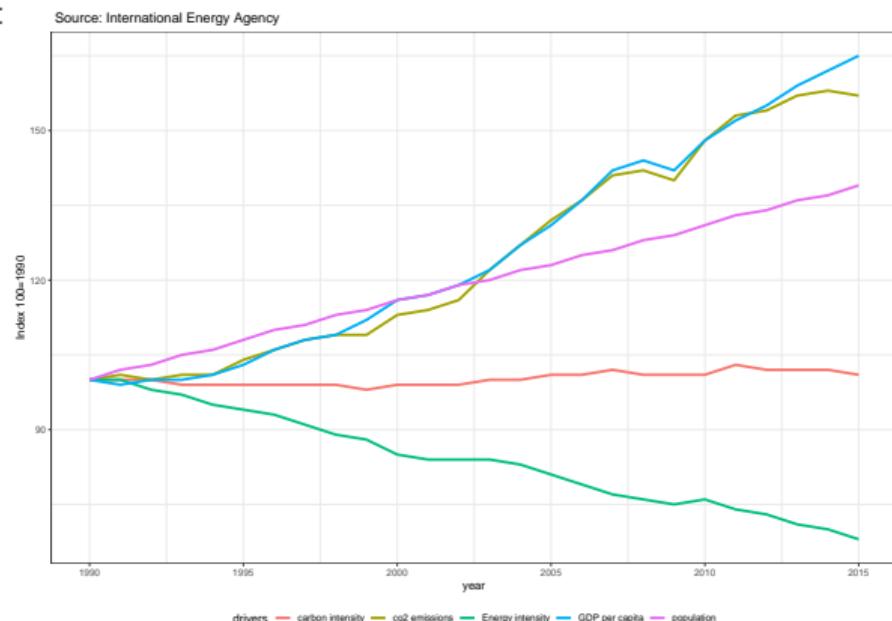
Indentité de Kaya:

D'après l'identité comptable de Kaya (voir Kaya et al. 1997 et Waggoner et Ausubel (2002):

$$CO_{2,t} = POP_t \times \frac{GDP_t}{POP_t} \times \frac{ENE_t}{GDP_t} \times \frac{CO_{2,t}}{ENE_t}$$

En appliquant le \log de part d'autres et en retranchant $\log(CO_2_{t-1})$, on obtient:

$$g_{CO_2} = g_{POP} + g_{GDP/POP} + g_{ENE/GDP} + g_{CO2/ENE}$$



Décomposition des drivers des émissions de GES selon l'identité de Kaya Source : Bouter (2021).

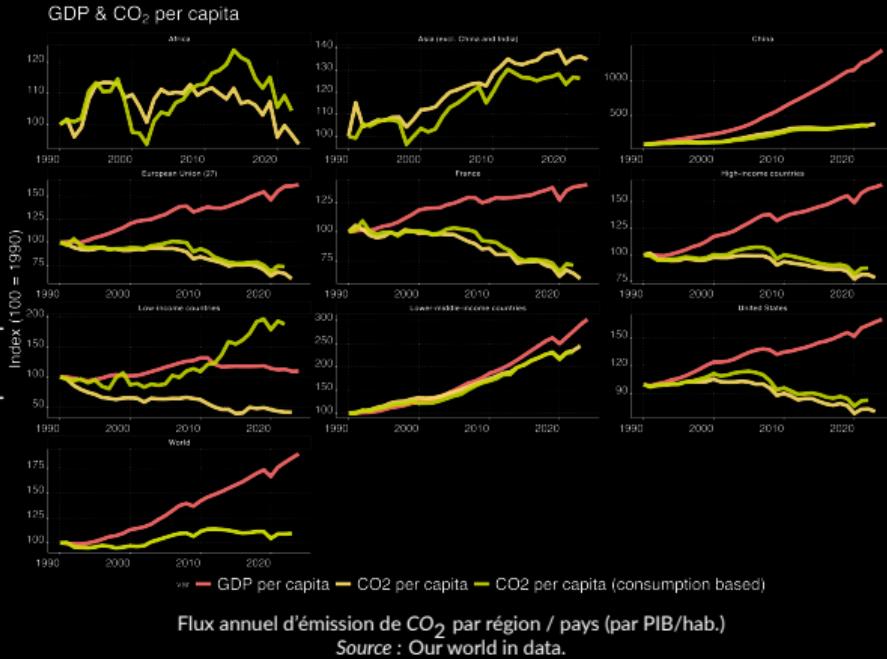
Découplage du PIB et des émissions de GES

→ Constat historique

- Plus de richesse ⇒ plus d'émissions
- Croissance et CO₂ fortement corrélés

→ Tendance récente

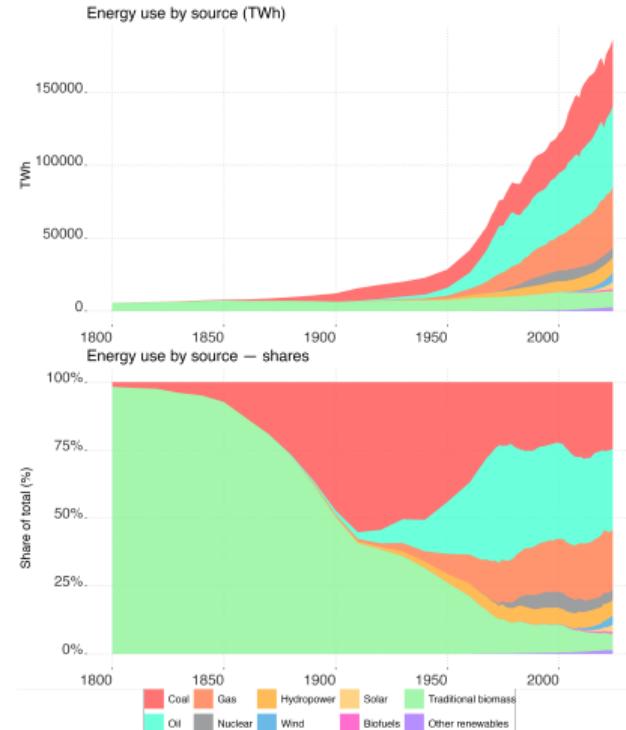
- Décorrélation dans les pays riches
- Exemple : Royaume-Uni, PIB ↑ / CO₂ ↓
- Moins d'énergie fossile, plus d'efficacité
- Décarbonation réelle, pas seulement délocalisée
- Croissance et baisse des émissions sont compatibles
- Le défi : accélérer la transition mondiale



Mix énergétique mondial

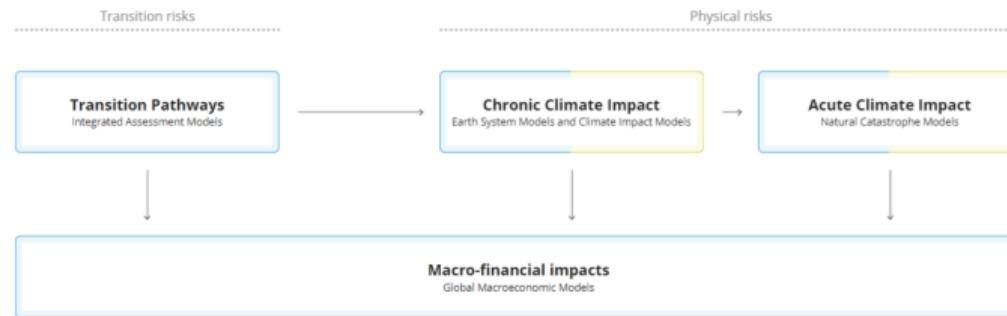
- L'énergie représente près de 75 % des émissions mondiales de GES
- La décarbonation passe par le remplacement des fossiles par les ENR
- Seules 15 % des énergies primaires sont bas carbone (nucléaire, hydro, solaire, éolien, bioénergie)
- Les coûts du solaire et de l'éolien ont chuté de plus de 70 % en dix ans
- Mais les ENR restent intermittentes
- Risque d'actifs échoués (*stranded assets*)
- Risques inflationnistes liés à la transition (*greenflation*)

Source : IRENA, Renewable Power Generation Costs in 2023 (2024)



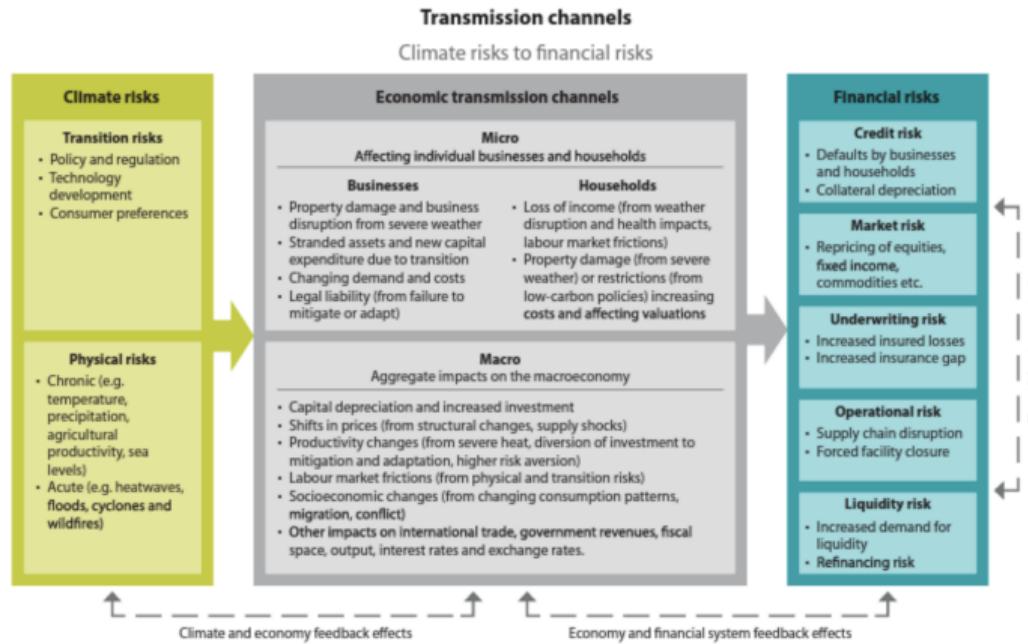
Consommation mondiale d'énergie par type
Source : Our world in data.

Risques physiques, risques de transition et modélisation macroéconomique



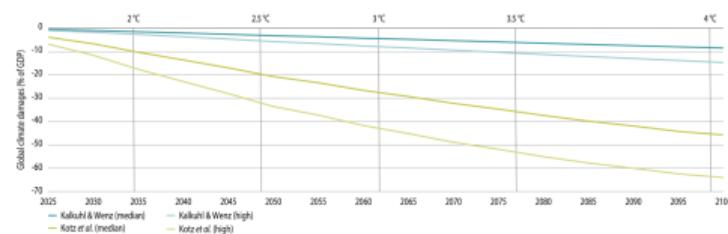
Impacts macroéconomiques des politiques et du changement climatique
Source : NGFS.

Changement climatique et sphère financière



Canaux de transmission
Source : NGFS.

Fonctions de dommages



Source: NGFS calculations.

Conséquences temporelles de la hausse de la température sur le PIB
Source : NGFS

Study	Impact at 2 °C global warming (Current Policies in 2009)		Impact at 3 °C global warming (Current Policies in 2100)	
	1%	3%	1%	3%
Nordhaus & Boyer (2000)	0%	0%	2%	3%
Tal (2009)	1%	1%	3%	3%
Weizsäcker (2012)	1%	1%	22%	22%
Dell et al. (2012)	4%	4%	2%	2%
Tal (2014)	1%	1%	2%	2%
Nordhaus (2014)	1%	1%	2%	2%
Diets & Sterk (2015)	2%	13%	2%	13%
Burkman (2015)	6%	14%	6%	14%
Howard & Horner (2017)	2%	8%	2%	8%
Konings (1996)	1%	2%	1%	2%
Kalkuhl & Wenz (2020)	2%	5%	2%	5%
Kahn et al. (2021)	1%	8%	1%	8%
Wiedenhofer et al. (2004)	4%	8%	4%	8%
Milà & Kärnä (2014)	19%	44%	19%	44%
Kotz et al. (2014)	14%	33%	14%	33%

1. Using RCP8.5, the most severe of the seven Representative Concentration Pathways (RCPs) presented in the IPCC's Fifth Assessment Report, global warming reaches 4.8°C by 2100. Even when using the 1.5°C scenario of the Paris Agreement or RCP4.5, global warming reaches 2.3°C by 2050.

2. Global warming projections according to Global Climate Assessment Model (GCAM) 6.0 in Phase V of the NGFS Scenarios.
Note: Damage estimate relative to a baseline without further climate change. The percentage values in Table 1 are based on our own calculations and may differ from those in the literature. The values in Table 2 are based on the values from Table 1. These values have been averaged for the high-level comparison of severity levels across damage functions in which assumptions are aligned across projections. Further information on these calculations can be found in Annex 2.

Conséquences en 2050 et 2100 du changement climatique selon
plusieurs articles
Source : NGFS.

The background of the slide features a dark, almost black, landscape. Superimposed on it is a wireframe model of a mountain range. The wireframe consists of numerous thin, light-colored lines that form the peaks and slopes of several mountains. The highest peaks are located in the center-left of the frame, with one particularly prominent peak on the right side. The overall effect is minimalist and scientific.

**La relation entre production / consommation et stock de GES dans
l'atmosphère**

Bloc climat : hypothèses (GES)

Variables et paramètres

$$\begin{aligned} e_t &= \xi_t Y_t, & s_t &= e_t + (1 - \delta_e) s_{t-1}, & \delta_e &\in (0, 1) \\ \log \xi_t &= (1 - \rho_\xi) \log \bar{\xi} + \rho_\xi \log \xi_{t-1}, & \rho_\xi &\in (0, 1), \bar{\xi} > 0 \end{aligned}$$

Lecture :

- ξ_t : intensité d'émissions (tCO₂e par unité de PIB), AR(1) déterministe autour de $\bar{\xi}$.
- e_t : flux d'émissions annuelles.
- s_t : stock atmosphérique (accumulation : émissions moins « dégradation » naturelle à taux δ_e).
- Aucun coût d'atténuation ni dommages dans cette version

Climat & BGP : compatibilité et stationnarisation

Sous Harrod (travail-augmentant) et Cobb-Douglas : $Y_t = K_t^\alpha (A_t L_t)^{1-\alpha}$, avec $A_t = (1+g)^t A_0$.

Implications pour les GES :

$$e_t = \xi_t Y_t, \quad s_t = e_t + (1 - \delta_e) s_{t-1}$$

Si ξ_t converge vers une constante $\bar{\xi}$, alors e_t croît au même taux que Y_t .

Variables stationnarisées (détrendées par $(1+g)^t$) :

$$\hat{e}_t \equiv \frac{e_t}{(1+g)^t}, \quad \hat{s}_t \equiv \frac{s_t}{(1+g)^t}$$

$$\Rightarrow \hat{e}_t = \xi_t \hat{Y}_t, \quad \hat{s}_t = \xi_t \hat{Y}_t + \frac{1 - \delta_e}{1 + g} \hat{s}_{t-1}$$

Stabilité : le processus de \hat{s}_t est stable si $\frac{1 - \delta_e}{1 + g} < 1$ (toujours vérifié pour $g \geq 0$ et $\delta_e \in (0, 1)$).

Modèle stationnaire (avec climat)

On ajoute au *modèle stationnarisé* les équations climat suivantes :

$$\hat{e}_t = \xi_t \hat{Y}_t, \quad \hat{s}_t = \xi_t \hat{Y}_t + \frac{1 - \delta_e}{1 + g} \hat{s}_{t-1}, \quad \log \xi_t = (1 - \rho_\xi) \log \bar{\xi} + \rho_\xi \log \xi_{t-1}$$

Rappels (bloc réel stationnarisé) :

$$\hat{Y}_t = A_t \left(\frac{\hat{K}_{t-1}}{1 + g} \right)^\alpha L_t^{1-\alpha}, \quad \hat{l}_t = \hat{K}_t - (1 - \delta) \frac{\hat{K}_{t-1}}{1 + g}, \quad \hat{Y}_t = \hat{C}_t + \hat{l}_t + \hat{G}_t$$

Prix des facteurs et choix intratemporel :

$$\alpha \frac{\hat{Y}_t (1 + g)}{\hat{K}_{t-1}} = \frac{R_t}{1 - \tau_t^y}, \quad (1 - \alpha) \frac{\hat{Y}_t}{L_t} = \frac{\hat{W}_t (1 + \tau_t^{ss})}{1 - \tau_t^y}, \quad \frac{1 - \nu}{\nu} \frac{\hat{C}_t}{1 - L_t} = \hat{W}_t \frac{1 - \tau_t^{IR}}{1 + \tau_t^{TVA}}$$

Équilibre stationnaire : ajouts climat

Au SS (constantes ($\hat{Y}, \hat{K}, L, \hat{C}, \dots$)):

$$R = \frac{(1 + \tau^{inv})[1 - \beta(1 - \delta)(1 + g)^{1 + \nu(1 - \sigma)}]}{(1 - \tau^K) \beta (1 + g)^{\nu(1 - \sigma) - 1}}, \quad \hat{\gamma} = \eta = \frac{\hat{\kappa}}{\hat{\gamma}} \frac{g + \delta}{1 + g}, \quad \hat{Y} = \phi L, \quad \hat{W} = (1 - \alpha)\phi \frac{1 - \tau^y}{1 + \tau^{ss}}$$

Climat au SS : si $\xi = \bar{\xi}$,

$$\hat{e} = \bar{\xi} \hat{Y}, \quad \hat{s} = \frac{\bar{\xi} \hat{Y}}{1 - \frac{1-\delta_e}{1+g}} = \bar{\xi} \hat{Y} \frac{1+g}{\delta_e + g}$$

(ratio stock/flux stationnarisés borné pour $\delta_p + g > 0$).

IRF stationnarisées : fiscalité et trajectoires d'émissions

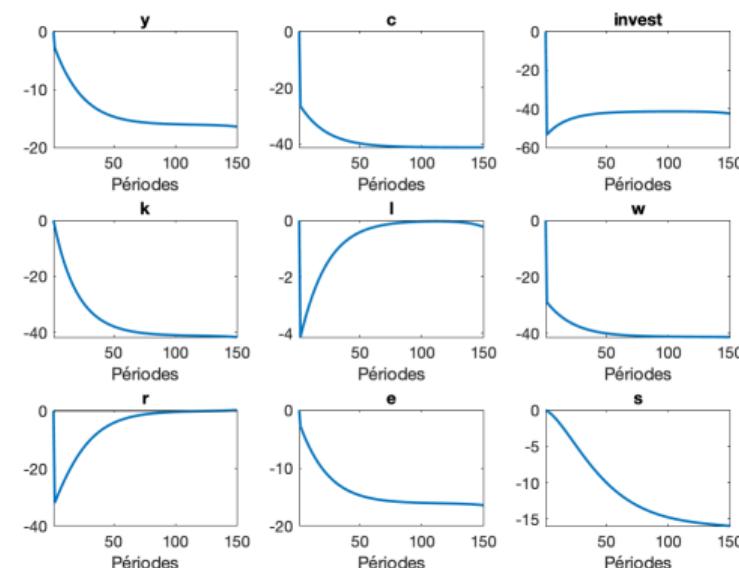
Choc et lecture du graphique

- IRF en % d'écart par rapport au SS stationnaire, sur 150 périodes.
- Choc : hausse temporaire de la **taxe sur la production** τ_y
- Réponse macro :
 - Y, C, K, L chutent → **contraction de l'activité**.
 - Les émissions e et le stock atmosphérique s **baisse en %** par rapport au trend de référence.
- Mécanisme clé :

$$e_t = \xi_t y_t$$

⇒ toute taxe qui frappe directement la production réduit aussi les émissions.
- Cohérence avec les résultats fiscaux : la **taxe sur la production** est la plus distorsive pour le PIB, et aussi la plus efficace pour faire baisser e et s à court / moyen terme.

IRF ($\Delta\%$ vs SS stationnaire)



IRF (en %) des principales variables macro et climatiques autour du BGP stationnaire.

Retour en niveaux : croissance, émissions et stock de GES

Pourquoi remettre les variables en niveau ?

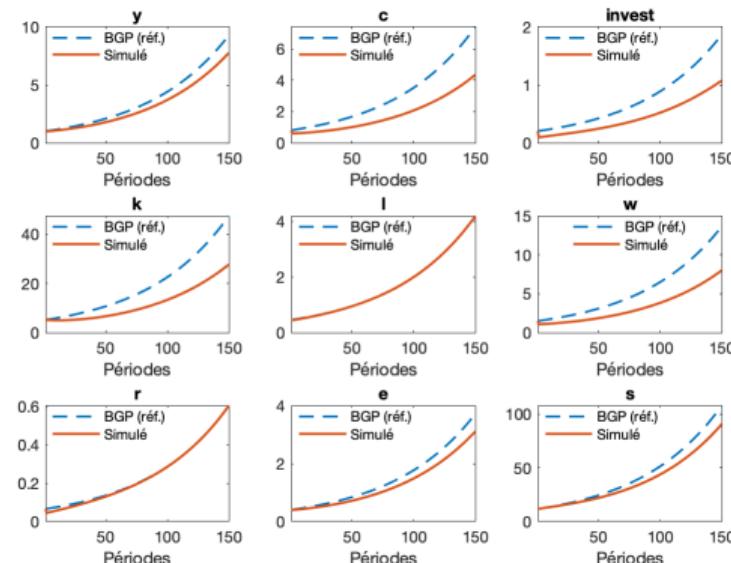
- Le modèle est stationnarisé autour d'un BGP de croissance g : les variables "avec chapeau" sont **sans trend**, mais dans la réalité Y_t , e_t et s_t sont **croissantes** dans le temps.
- On reconstruit les niveaux par :

$$X_t^{\text{niveau}} = \hat{X}_t \cdot (1 + g)^t$$

ce qui permet d'obtenir des trajectoires qui **ressemblent à des séries empiriques** :

- PIB, émissions et stock de GES croissants,
- Quand on introduit une **taxe sur la production** :
 - on "**casse la pente**" de Y_t ,
 - on réduit la trajectoire de e_t ,
 - on limite l'**accumulation** de s_t dans l'atmosphère.
- Mais dans ce modèle il n'y a pas de boucle rétroactive climat** ⇒ économie.:
 - s_t n'affecte ni la productivité, ni les préférences
 - on observe donc seulement le **coût** de la politique (PIB, bien-être), pas encore les **bénéfices** d'une baisse des émissions.

Variables remises en niveaux (référence BGP vs simulé)



Variables remises en niveaux : trajectoires simulées (plein) vs BGP de référence (pointillé).

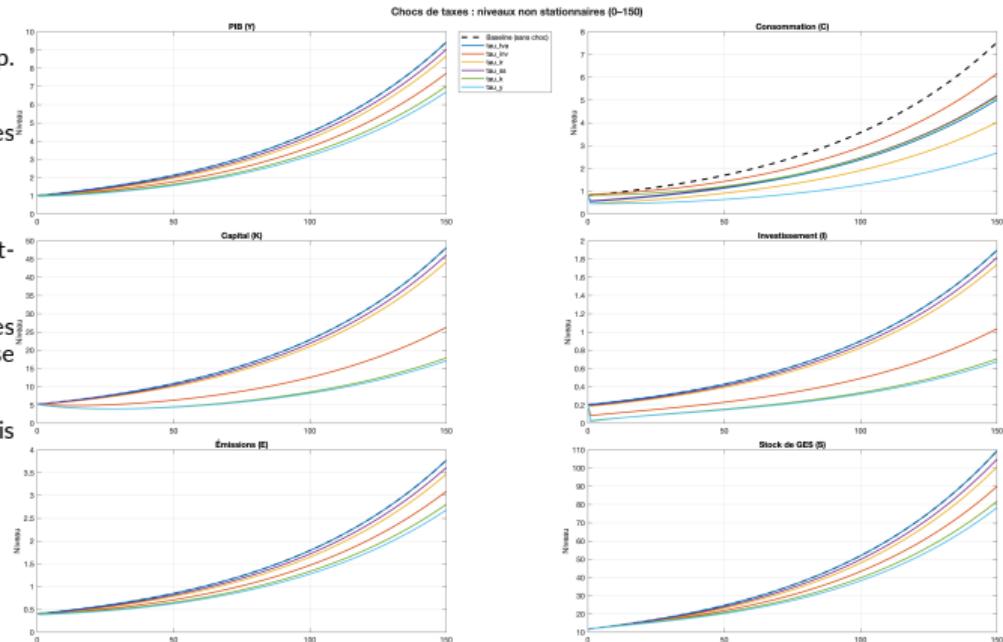
Chocs de taxes et trajectoires macro-climat en niveau

Boucle sur les taxes :

- pour chaque taxe, choc temporaire (par ex. 10 p.p. sur 150 périodes),
- reconstitution en niveau de Y , C , K et des variables climat (E , S).

Lecture économique :

- taxes les plus récessives \Rightarrow trajectoires de Y et K nettement en-dessous du scénario de référence ;
- impact sur les émissions E directement lié à Y : les taxes les plus récessives génèrent la plus forte baisse de GES à court terme ;
- le stock de carbone S réagit plus lentement, mais garde la signature des différentes taxes.



Réponses en niveau de Y , C , K , E , S à des chocs temporaires de chaque taxe.

Déviations relatives par rapport au scénario de référence (BAU)

Méthodologie

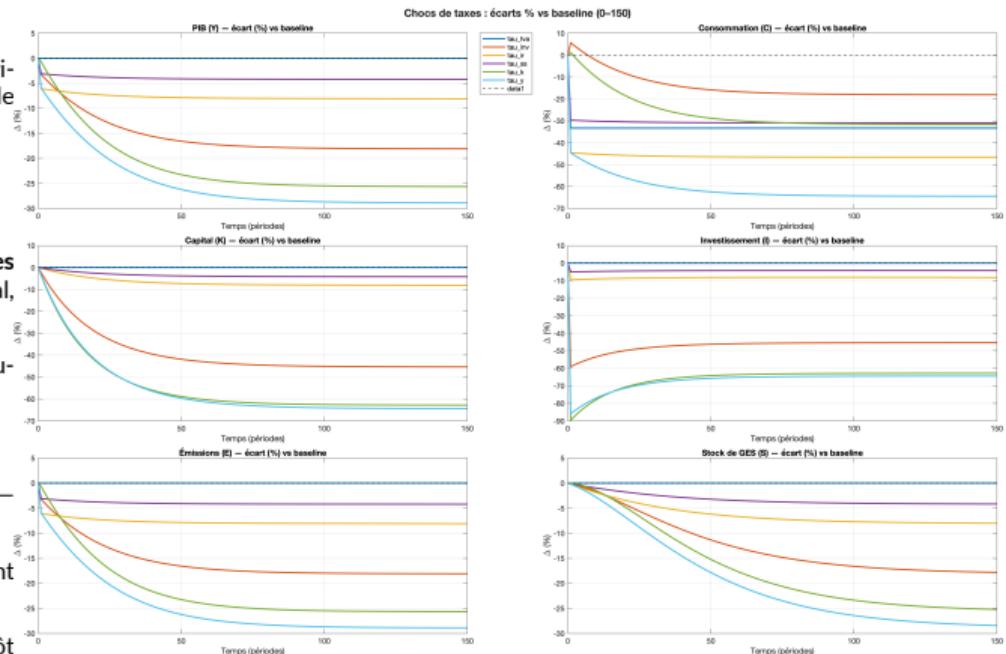
- On mesure la **variation relative** de chaque variable macroéconomique par rapport au scénario de référence sans taxe :

$$\frac{X_t^{\text{taxe}} - X_t^{\text{BAU}}}{X_t^{\text{BAU}}} \times 100$$

- Permet de comparer directement l'ampleur des écart dynamiques : PIB, consommation, capital, émissions, etc.
- Les réponses sont exprimées en % de déviation autour du BAU.

Lecture économique

- Taxe sur la production** : plus forte chute de Y et K – contraction marquée de l'activité.
- Taxe sur le capital / investissement** : ajustement graduel mais persistant – effet d'offre dominant.
- IR et cotisations sociales** : impact sur C et L plutôt que sur K .
- TVA** : impact concentré sur la demande – ajustement rapide et réversible.
- Effets climat** : baisse des émissions corrélée à la contraction de Y .

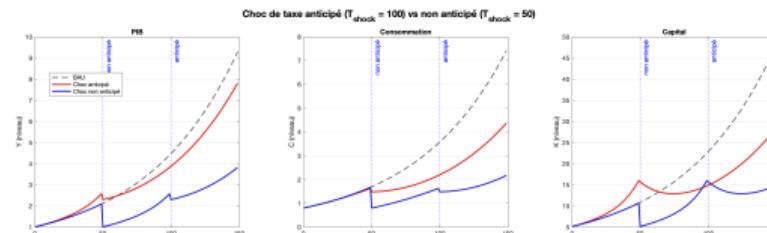


Déviations en % par rapport au scénario de référence sans taxe (BAU).

Choc de taxe anticipé vs choc non anticipé

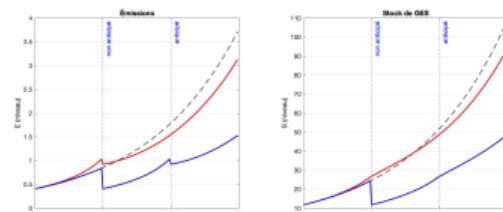
Construction :

- **Scénario 1** : choc de taxe *anticipé* à $t = 100$ (méthode standard perfect foresight).
- **Scénario 2** : choc *non anticipé* à $t = 50$:
 - l'économie suit le BAU jusqu'à $T_{\text{shock}} - 1$,
 - puis on la « branche » sur la trajectoire simulée avec choc à $t = 1$.



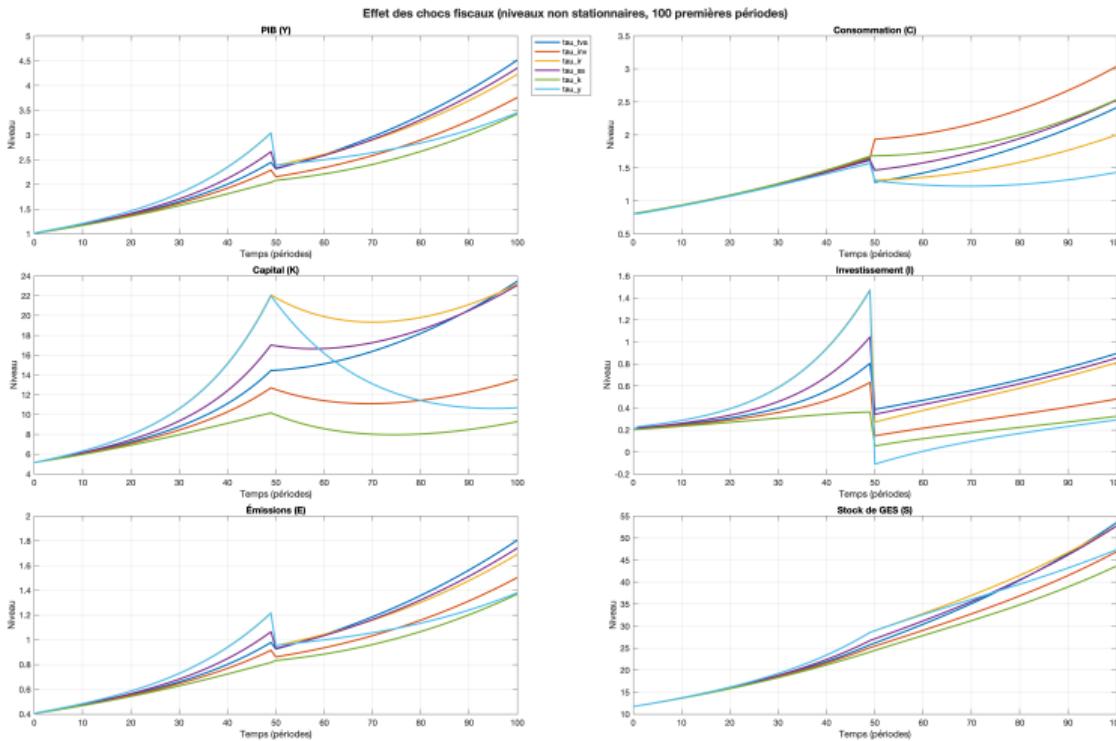
Résultats :

- dans le cas **anticipé**, les agents ajustent C et K avant le choc : l'économie « se prépare ».
- dans le cas **non anticipé**, l'ajustement est plus brutal : forte chute de C et de Y au moment du choc.
- les trajectoires de **long terme** convergent, mais la **transition** est très différente.



Y, C, K, E, S : BAU (pointillé), choc anticipé (rouge), choc non anticipé (bleu).

Le rôle des anticipations et l'adaptation des agents économiques aux taxes

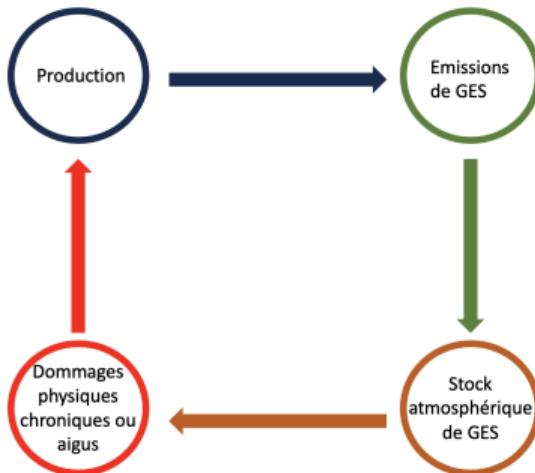


Anticipation de la mise en place d'une taxe en t=50

The background is a dark, almost black, surface. Superimposed on it is a wireframe model of a mountain range. The mountains are rendered with a dense grid of thin white lines, creating a sense of depth and rugged terrain. The peaks are sharp and pointed, with the highest peak on the left and a slightly lower one on the right. The base of the mountains is obscured by the dark background.

Rétroaction du changement climatique sur l'économie

Principe de la rétroaction du climat sur l'économie



Boucle climat-économie : les émissions dégradent le climat, ce qui réduit la production potentielle.

Idée centrale : le climat n'est plus exogène – les émissions de gaz à effet de serre (e_t) influencent la productivité et donc la croissance future.

Chaîne causale du modèle :

$$Y_t \Rightarrow e_t \Rightarrow s_t \Rightarrow d_t \Rightarrow Y_{t+1}$$

- Y_t génère des **émissions** proportionnelles ($e_t = \xi_t Y_t$).
- Ces émissions s'accumulent dans un **stock atmosphérique** s_t .
- Le stock altère la productivité globale via un **facteur de dommages** $d_t \in (0, 1]$.
- Le PIB net $\hat{Y}_t = d_t \hat{y}_{g,t}$ diminue proportionnellement aux dommages.

Intérêt macroéconomique :

- Introduit un **canal de rétroaction** entre activité économique et climat.
- Permet d'analyser les **coûts de l'inaction climatique** et la **vitesse de décarbonation**.
- Compatible avec une **croissance équilibrée** (BGP Harrod).

Production Harrod et stationnarisation (avec dommages)

Niveau (Harrod, travail-augmentant) :

$$Y_t = K_{t-1}^\alpha (A_t L_t)^{1-\alpha}, \quad A_t = \gamma^t \tilde{A}_t, \quad \gamma = 1 + g.$$

Variables stationnarisées : $\hat{X}_t \equiv X_t / \gamma^t$. Alors

$$\hat{y}_{g,t} = \tilde{A}_t \left(\frac{\hat{K}_{t-1}}{\gamma} \right)^\alpha L_t^{1-\alpha}, \quad \hat{Y}_t = d_t \hat{y}_{g,t}, \quad d_t = B \exp(-\phi(s_t - \bar{s})).$$

GES (stationnarisé) :

$$\hat{e}_t = \xi_t \hat{Y}_t, \quad \hat{s}_t = \xi_t \hat{Y}_t + \frac{1 - \delta_e}{\gamma} \hat{s}_{t-1}, \quad \xi_t = \rho_\xi \xi_{t-1}.$$

Note : ici \tilde{A}_t est la TFP stationnaire. Toute la tendance de long terme est portée par γ .

Bloc réel stationnarisé complet (avec climat et dommages)

Équations principales :

$$\begin{cases} \hat{Y}_t = \hat{C}_t + \hat{I}_t + \hat{G}_t \\ \hat{I}_t = \hat{K}_t - (1 - \delta) \frac{\hat{K}_{t-1}}{\gamma} \\ \hat{Y}_t = d_t \tilde{A}_t \left(\frac{\hat{K}_{t-1}}{\gamma} \right)^{\alpha} L_t^{1-\alpha} \\ \alpha \frac{\hat{Y}_t \gamma}{\hat{K}_{t-1}} = \frac{R_t}{1 - \tau_t^y} \\ (1 - \alpha) \frac{\hat{Y}_t}{L_t} = \frac{\hat{W}_t (1 + \tau_t^{ss})}{1 - \tau_t^y} \\ \frac{1 - \nu}{\nu} \frac{\hat{C}_t}{1 - L_t} = \hat{W}_t \frac{1 - \tau_t^{IR}}{1 + \tau_t^{TV\Delta}} \end{cases}$$

Bloc climat-dommages :

$$\hat{e}_t = \xi_t \hat{Y}_t, \quad \hat{s}_t = \xi_t \hat{Y}_t + \frac{1 - \delta_e}{\gamma} \hat{s}_{t-1}, \quad d_t = B e^{-\phi(s_t - \bar{s})}, \quad \xi_t = \rho_{\xi} \xi_{t-1}.$$

Boucle climat-production et cohérence BGP

Chaîne de causalité dans le modèle :

$$K_{t-1}, L_t, A_t \Rightarrow \hat{y}_{g,t} \Rightarrow \hat{Y}_t = d_t \hat{y}_{g,t} \Rightarrow e_t = \xi_t \hat{Y}_t \Rightarrow s_t = e_t + (1 - \delta_e) s_{t-1} \Rightarrow d_t = B e^{-\phi(s_t - \bar{s})}.$$

Mécanisme :

- Un stock s_t plus élevé augmente les dommages ($\rightarrow d_t \uparrow$).
- Une baisse de d_t réduit la production nette \hat{Y}_t .
- Moins de production $\rightarrow y_t \downarrow \rightarrow$ moins d'émissions $\rightarrow e_t \downarrow \rightarrow$ stabilisation du stock à long terme ($\rightarrow s_t \simeq$).

Compatibilité BGP :

- Sous $\rho_\xi < 1$, l'intensité ξ_t décroît, les émissions s'éteignent ($e_t \rightarrow 0$).
- Le stock converge vers \bar{s} , et $d_t \rightarrow B$ (souvent $B = 1$).
- Le bloc réel retrouve un BGP standard : $\hat{Y}, \hat{K}, \hat{C}$ constants.

Équilibre stationnaire (avec climat et dommages)

Au SS (constantes $\hat{Y}, \hat{K}, L, \hat{C}, \dots$):

$$R = \frac{(1 + \tau^{inv})[1 - \beta(1 - \delta)\gamma^{1+\nu(1-\sigma)}]}{(1 - \tau^K)\beta\gamma^{\nu(1-\sigma)-1}}, \quad \frac{\hat{I}}{\hat{Y}} = \eta = \frac{\hat{K}}{\hat{Y}} \frac{g + \delta}{\gamma}.$$

Production nette :

$$\hat{Y} = d \tilde{A}^{\frac{1}{1-\alpha}} \left(\frac{\alpha(1 - \tau^Y)}{R} \right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} L, \quad \hat{W} = (1 - \alpha) \hat{Y} / L \frac{1 - \tau^Y}{1 + \tau^{ss}}.$$

Climat au SS :

$$\hat{e} = \bar{\xi} \hat{Y}, \quad \hat{s} = \frac{\bar{\xi} \hat{Y}}{1 - \frac{1 - \delta_e}{\gamma}} = \bar{\xi} \hat{Y} \frac{\gamma}{\delta_e + g}, \quad d_{ss} = B e^{-\phi(\hat{s} - \bar{s})}.$$

Si $\bar{\xi} = 0$ (décarbonation complète) : $d_{ss} = B = 1$, le SS réel n'est pas modifié.

Effet des paramètres climat sur l'équilibre stationnaire

Paramètres clés :

$$(\phi, \rho_{\xi}, \delta_e, \bar{\xi}).$$

Effets directionnels :

- $\phi \uparrow$ (dommages plus raides) $\Rightarrow d \downarrow, \hat{Y} \downarrow, \hat{W} \downarrow.$
- $\rho_{\xi} \uparrow$ (décarbonation plus lente) $\Rightarrow \xi_t$ plus élevé, $s_t \uparrow, d_t \downarrow.$
- $\delta_e \uparrow$ (puits plus fort) $\Rightarrow s_t \downarrow, d_t \uparrow$, production nette plus élevée.
- $\bar{\xi} \uparrow$ (intensité de long terme) \Rightarrow hausse permanente du stock \Rightarrow baisse du produit net.

Interprétation macro :

- Les dommages agissent comme une *TFP endogène négative*.
- À long terme, la trajectoire de croissance équilibrée dépend de la vitesse de décarbonation ρ_{ξ} et du puits naturel δ_e .

Impact des dommages sur le sentier de croissance équilibrée

- Tant que $d_t < 1$, la croissance effective de Y_t est inférieure à celle du BGP :

$$g_Y \approx g + \frac{\Delta d_t}{d_t}.$$

- Si ξ_t décroît assez vite, $d_t \rightarrow 1$, et le modèle converge vers le BGP standard ($g_Y \rightarrow g + n$).
- Si ξ_t décroît lentement (ρ_ξ proche de 1), alors s_t croît longtemps :

$$s_t \approx \frac{\xi_t Y_t}{\delta_e + g}, \quad d_t = B e^{-\phi(s_t - \bar{s})} < 1,$$

ce qui crée une **croissance effective plus faible** pendant la transition.

Lecture politique : plus la décarbonation est lente, plus la période de croissance ralentie est longue — sans modifier le régime de long terme si $\xi_t \rightarrow 0$.

Extension : politique climatique et bouclage fiscal

Exemples d'extensions possibles :

- Taxe carbone τ_t^{CO2} : $G_t = \tau_t^{CO2} e_t + \dots$, effet budgétaire et sur la demande (réduction des émissions).
- Dommages endogènes dans la TFP : $A_t^{eff} = A_t \cdot d_t$, explicitant le canal productif.
- Décarbonation active : $\xi_t = (1 - \mu_t) \rho_\xi \xi_{t-1}$, avec coût d'abattement $\Psi(\mu_t)$ dans la contrainte de ressources.

Conclusion : intégration climat dans un modèle à BGP Harrod

1. **Structure de base :** Production Harrod + capital accumulable + travail endogène.
2. **Extension climat :** Ajout d'un bloc émissions-stock-dommages :

$$\hat{e}_t = \xi_t \hat{Y}_t, \quad \hat{s}_t = \xi_t \hat{Y}_t + \frac{1 - \delta_e}{\gamma} \hat{s}_{t-1}, \quad d_t = B e^{-\phi(s_t - \bar{s})}.$$

3. **Cohérence BGP :** Si $\xi_t \rightarrow 0$, le BGP est inchangé (dommages transitoires). Si $\xi_t \rightarrow \bar{\xi} > 0$, la croissance équilibrée est plus lente mais reste stable.
4. **Lecture économique :** Les dommages agissent comme un multiplicateur de productivité négatif. Leur dynamique dépend de la persistance du carbone et de la vitesse de décarbonation.

Pourquoi la Lambert W ici ? (boucle $y \leftrightarrow s \leftrightarrow d$)

Boucle au SS (stationnarisé Harrod) :

$$\hat{Y} = d \hat{y}_g, \quad d = B e^{-\phi(\hat{s} - \bar{s})}, \quad \hat{s} = \kappa \hat{Y}, \quad \kappa \equiv \frac{\bar{\zeta} \gamma}{\delta_e + g}.$$

En combinant :

$$\hat{Y} = B e^{-\phi(\kappa \hat{Y} - \bar{s})} \hat{y}_g.$$

Or au SS, $\hat{y}_g = \tilde{A}^{\frac{1}{1-\alpha}} \left(\frac{\alpha}{R} \right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} L$.

Problème : \hat{Y} est à la fois *en facteur* et *dans l'exponentielle*.

Scénarios de dommages climatiques : calibration

Trois scénarios de sévérité croissante :

Scénario	Paramètre	Interprétation	Type
Baseline (null)	$\phi \approx 0$	Pas de dommages	Référence
Modéré (low)	$\phi = 0,01$	Dommages modérés	Nordhaus (2017)
Sévère (high)	$\phi = 0,1$	Dommages élevés	Weitzman (2012)

Expérience menée : choc de productivité transitoire

- Période $t = 50$ à $t = 150$: $A_t = 1,1 \times A_{50}$ (+10%)
- Retour au niveau normal après $t = 150$
- Objectif : mesurer comment les dommages modifient la réponse macroéconomique

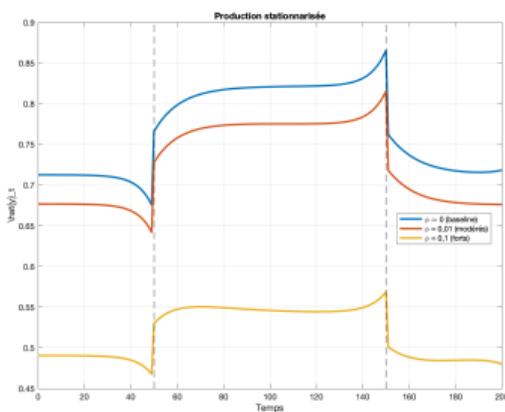
Fonction de dommage :

$$d_t = B \cdot \exp(-\phi(s_t - \bar{S})), \quad B = 1$$

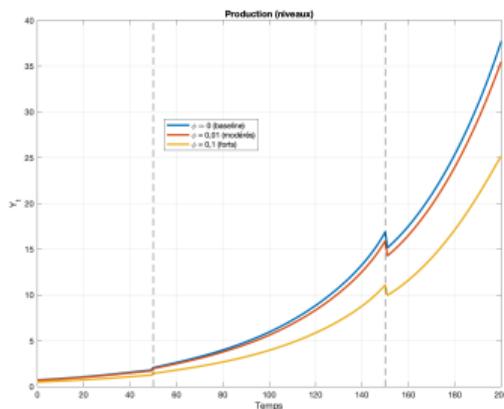
Plus ϕ est élevé, plus l'accumulation de GES dégrade la productivité.

Impact des dommages sur la production : niveaux

Production en niveaux (stationnarisé)



Production en niveaux absolus



Observations :

- Le choc de productivité ($t=50-150$) stimule temporairement la production
- Avec dommages modérés ($\phi = 0,01$) : léger décrochage
- Avec dommages sévères ($\phi = 0,1$) : perte significative persistante
- En niveaux absolu : l'écart s'amplifie avec la croissance

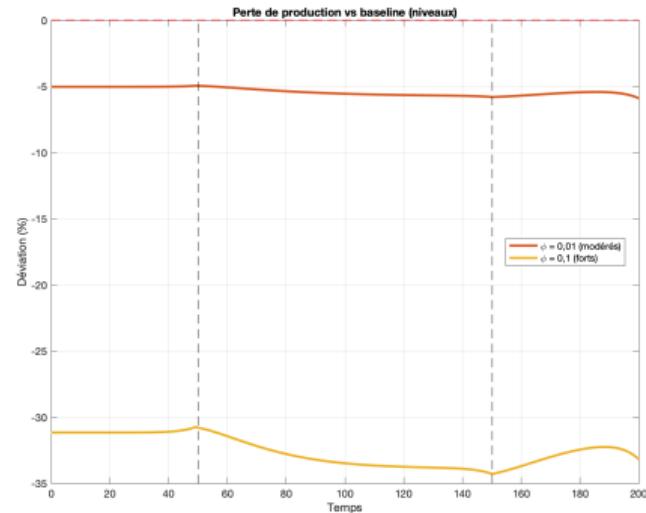
Pertes de production dues aux dommages climatiques

Messages clés :

- Les pertes se creusent pendant le choc ($t=50-150$) car plus de production \Rightarrow plus d'émissions \Rightarrow plus de dommages
- Même après la fin du choc, les pertes **persistent** (stock de GES)
- Scénario modéré : perte moyenne de **5,4%**, atteignant jusqu'à **5,9%**
- Scénario sévère : perte moyenne de **32,6%**, avec des pics à **34,3%**
- Perte permanente à long terme ($t=200$) : **5,9%** (modéré) et **33,2%** (sévère)

Interprétation : En niveaux, l'écart absolu continue de croître avec γ^t : un choc temporaire crée un héritage climatique définitif.

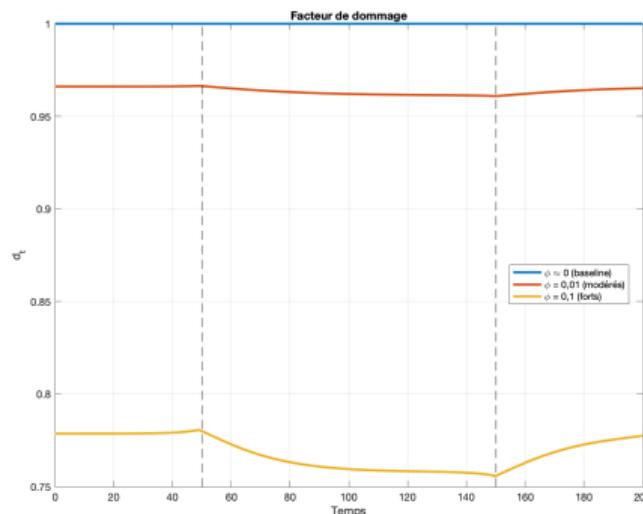
Déviation par rapport à la baseline



Production en niveaux : écart relatif (%)

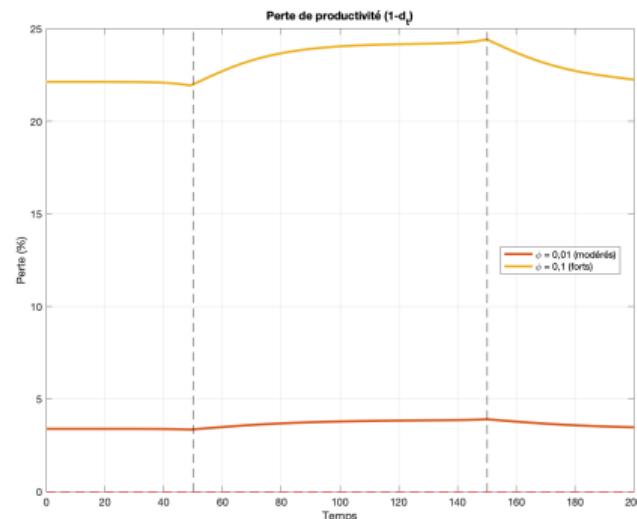
Évolution du facteur de dommage d_t

Facteur d_t (multiplicateur de TFP)



$$d_t = B \cdot \exp(-\phi(s_t - \bar{s}))$$

Perte de productivité ($1 - d_t$)



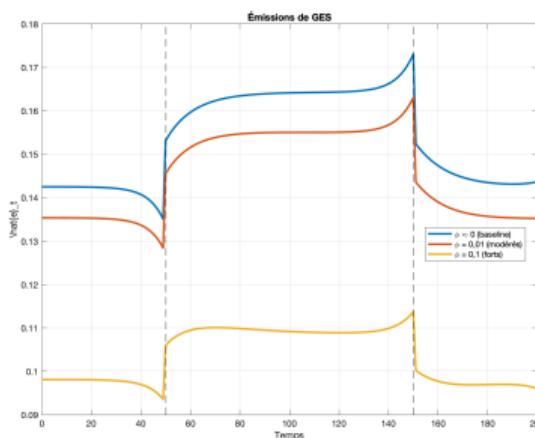
Impact direct sur la production

Interprétation :

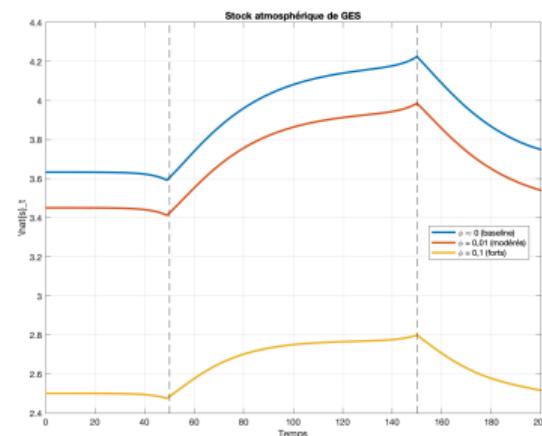
$$\hat{Y}_t = \underbrace{d_t}_{\text{facteur de dommage}} \times \underbrace{\hat{y}_{g,t}}_{\text{production brute}}$$

Boucle climat : émissions et accumulation de GES

$$\text{Émissions } e_t = \xi_t \hat{Y}_t$$



$$\text{Stock atmosphérique } s_t$$

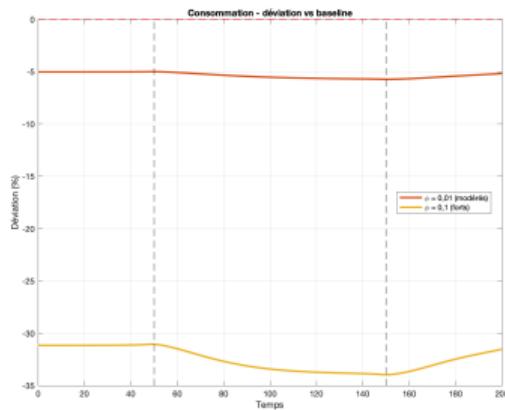


Mécanisme de rétroaction :

- ① Choc de productivité ($t=50$) $\Rightarrow \hat{Y}_t \uparrow \Rightarrow e_t \uparrow$
- ② Accumulation : $s_t = e_t + \frac{1-\delta_e}{\gamma} s_{t-1} \Rightarrow s_t \uparrow$
- ③ Dommages : $d_t = \exp(-\phi s_t) \Rightarrow d_t \downarrow \Rightarrow \hat{Y}_t \downarrow$
- ④ Effet modérateur : production réduite \Rightarrow moins d'émissions
- ⑤ Persistance : même après $t=150$, le stock reste élevé (décroissance lente)

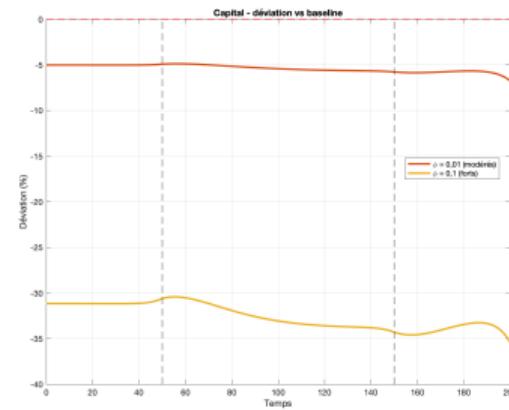
Propagation aux autres variables macroéconomiques

Consommation \hat{C}_t



Déviation vs baseline (%)

Capital \hat{K}_t



Déviation vs baseline (%)

Canaux de transmission :

- **Consommation** : suit la production avec une volatilité amplifiée
- **Capital** : accumulation ralentie par la baisse de l'investissement
- **Travail** : variation minime (contrainte intra-temporelle)
- Les effets sont **plus marqués** en scénario sévère

Coût macroéconomique des dommages climatiques

Pertes cumulées de production (sur 200 périodes) :

Scénario	Perte moyenne (%)	Perte max (%)
Modéré ($\phi = 0,01$)	5,4%	5,9%
Sévère ($\phi = 0,1$)	32,6%	34,3%

En valeur actualisée nette (VAN, stationnarisée) :

$$\text{Coût} = \sum_{t=0}^{200} \beta^t \left(\hat{Y}_t^{baseline} - \hat{Y}_t^{damage} \right)$$

(avec $\beta = 0,95$ par période)

Scénario	VAN pertes (unités de \hat{Y})
Modéré ($\phi = 0,01$)	0,716
Sévère ($\phi = 0,1$)	4,443

Lectures économiques :

- Un choc de productivité temporaire a des **conséquences permanentes** via le climat
- L'inaction climatique équivaut à une **taxe implicite sur la croissance**

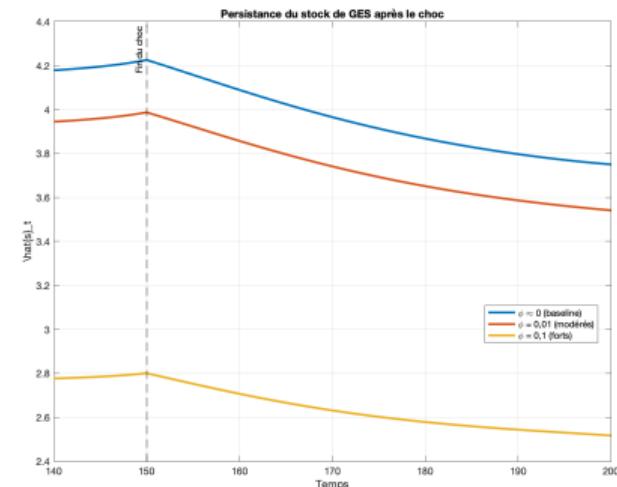
Persistance des effets : l'hystérèse climatique

Pourquoi les pertes persistent après t=150 ?

Stock de GES :

$$s_t = e_t + \underbrace{\frac{1 - \delta_e}{\gamma} s_{t-1}}_{<1}$$

- $\delta_e = 0,02$: puits naturel faible
- Demi-vie : $T_{1/2} \approx \frac{\ln 2}{\delta_e + g} \approx 15\text{-}20$ périodes
- Le stock accumulé pendant t=50-150 met des **décennies** à se ré-sorber



Décroissance lente du stock

Implication politique :

- Les émissions d'aujourd'hui affectent la production de demain
- Justification d'une **taxe carbone** internalisant ce coût futur
- Importance de la **décarbonation préventive** (réduire ζ_t avant le choc)

Synthèse : enseignements de la simulation

1. Validation du mécanisme de rétroaction :

- Le modèle reproduit la boucle $Y_t \Rightarrow e_t \Rightarrow s_t \Rightarrow d_t \Rightarrow Y_t$
- Le facteur de dommage agit comme une TFP endogène dégradée par le climat

2. Impact d'un choc transitoire de productivité ($t=50-150$, +10%) :

- Un boom temporaire crée un héritage climatique négatif **permanent**
- Les dommages créent une perte durable
- À $t=200$: pertes persistantes de 5,9% (modéré) et 33,2% (sévère)

3. Quantification macroéconomique :

- Scénario modéré ($\phi = 0,01$) : perte moyenne de **5,4%** du PIB, VAN = 0,72
- Scénario sévère ($\phi = 0,1$) : perte moyenne de **32,6%**, VAN = 4,44
- Persistance multi-décennale due au puits naturel faible ($\delta_e = 0,02$)

4. Extensions possibles :

- Introduire une taxe carbone optimale minimisant la VAN des pertes
- Analyser des trajectoires de décarbonation accélérée (ρ_ζ variable)
- Tester des chocs permanents ou des politiques d'atténuation

The background of the slide features a dark, almost black, surface. Superimposed on it is a wireframe model of a mountain range. The mountains are rendered with numerous thin, light-colored lines that create a sense of depth and perspective, with the peaks appearing higher and more detailed than the lower slopes. The overall effect is minimalist and modern.

Trade off entre la taxe carbone et le bien être: dommage vs courbe marginale d'ajustement carbone

Bilan de la section précédente : le coût de l'inaction

Ce que nous avons appris :

- La boucle $Y_t \Rightarrow e_t \Rightarrow s_t \Rightarrow d_t \Rightarrow Y_t$ crée une **rétroaction négative**
- Un choc transitoire de productivité (+10%, t=50-150) génère des pertes **permanentes** :
 - Dommages modérés ($\phi = 0,01$) : -5,4% du PIB en moyenne
 - Dommages sévères ($\phi = 0,1$) : -32,6% du PIB en moyenne
- La persistance est forte : le stock de GES met des **décennies** à se résorber ($\delta_e = 0,02$)

Limite du modèle précédent :

*L'économie subit passivement les dommages climatiques
Aucune action d'atténuation n'est possible*

⇒ **Question naturelle** : Ne vaudrait-il pas mieux investir dans la décarbonation ?

Extension : politique climatique avec arbitrage coût-bénéfice

Nouveaux ingrédients du modèle :

① Effort d'abattement $\mu_t \in [0, 1]$:

- Réduit l'intensité carbone : $\zeta_t = (1 - \mu_t) \times \zeta_t^{\text{tendance}}$
- Interprétation : efficacité énergétique, transition vers énergies bas-carbone

② Coût d'abattement quadratique :

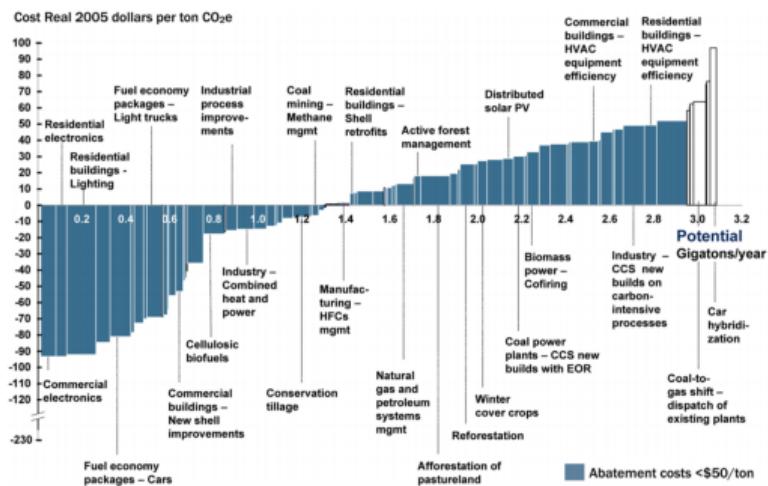
$$\Psi_t = \frac{\chi}{2} \mu_t^2 y_t$$

- Prélève des ressources : $y_t = c_t + i_t + \Psi_t$
- Courbe marginale d'abattement (MAC) : $\frac{\partial \Psi}{\partial \mu} = \chi \mu_t y_t$

Arbitrage central :

Coût immédiat de l'abattement (Ψ_t)
vs
Bénéfice futur de la réduction des dommages ($d_t \uparrow$)

Courbe MACC empirique



Lecture du graphique :

- Axe horizontal : volume d'abattement (GtCO₂/an)
- Axe vertical : coût marginal (/tCO₂)
- Chaque barre = technologie de décarbonation
- Courbe croissante : options les moins chères d'abord

Approximation dans le modèle :

On approche cette courbe par un coût quadratique :

$$\Psi_t = \frac{\chi}{2} \mu_t^2 y_t$$

Le coût marginal d'abattement :

$$\frac{\partial \Psi_t}{\partial \mu_t} = \chi \mu_t y_t$$

⇒ Croît linéairement avec l'effort μ_t

Propriétés désirables :

- Convexité** : les premiers % d'abattement sont moins coûteux
- Coût nul si $\mu_t = 0$** (pas d'effort)
- Croissance accélérée** : décarboner complètement ($\mu \rightarrow 1$) devient prohibitif
- Paramètre χ : calibre l'intensité du coût

Exemple numérique :

Si $\chi = 0,5$ et $y_t = 1$:

- $\mu = 10\% : \Psi = 0,25\%$ du PIB
- $\mu = 50\% : \Psi = 12,5\%$ du PIB
- $\mu = 90\% : \Psi = 40,5\%$ du PIB

Politique climatique : abattement et taxe carbone

Abattement (efficacité énergétique/décarbonation) :

$$\xi_t = (1 - \mu_t) \left((1 - \rho_\xi) \bar{\xi}_{\text{eff},t} + \rho_\xi \xi_{t-1} \right), \quad \mu_t \in [0, 1].$$

Coût d'abattement (ressource) :

$$\Psi_t = \frac{\chi}{2} \mu_t^2 y_t, \quad y_t = c_t + i_t + \Psi_t.$$

Taxe carbone (rebattue) :

$$tr_t = \tau_t^{CO2} e_t, \quad e_t = \xi_t y_t.$$

Lecture : μ_t réduit l'intensité d'émission ξ_t (moins d'émissions) au prix d'un coût Ψ_t . La taxe est un transfert lump-sum (ne modifie pas la contrainte globale).

Boucle climat-production avec politique

$$\begin{aligned} y_{g,t} \Rightarrow y_t &= d_t y_{g,t}, \quad d_t = B e^{-\phi_{\text{eff},t}(s_t - \bar{s})} \\ \xi_t &= (1 - \mu_t) \left((1 - \rho_\xi) \bar{\xi}_{\text{eff},t} + \rho_\xi \xi_{t-1} \right), \quad e_t = \xi_t y_t \\ s_t &= e_t + \frac{1 - \delta_{e,\text{eff},t}}{\gamma} s_{t-1}, \quad y_t = c_t + i_t + \Psi_t, \quad \Psi_t = \frac{\chi}{2} \mu_t^2 y_t. \end{aligned}$$

Chaîne : $\mu_t \uparrow \Rightarrow \xi_t \downarrow \Rightarrow e_t \downarrow \Rightarrow s_t \downarrow \Rightarrow d_t \uparrow \Rightarrow y_t \uparrow$ (via moins de dommages) mais $\Psi_t \uparrow$ rogne la ressource \Rightarrow arbitrage intertemporel (coût maintenant vs. dommages futurs).

Décomposition du PIB net et lecture empirique

PIB brut vs net :

$$\underbrace{y_{g,t}}_{\text{brut}} \xrightarrow{d_t} \underbrace{y_t = d_t y_{g,t}}_{\text{net dommages}} \xrightarrow{-\Psi_t} \underbrace{c_t + i_t = y_t - \Psi_t}_{\text{utilisable}}$$

Lecture dynamique :

- Au court terme : $\mu_t > 0 \Rightarrow \Psi_t > 0$ (ressource \downarrow), mais $e_t \downarrow$.
- Au moyen/long terme : $s_t \downarrow \Rightarrow d_t \uparrow \Rightarrow y_t$ et $w_t \uparrow$.

Équilibre stationnaire et BGP (avec politique)

Stationnarisation Harrod : $\hat{X}_t = X_t / \gamma^t$. Au SS : $\hat{Y}, \hat{K}, L, \hat{C}, \hat{s}, \hat{\epsilon}$ constants, $\mu \rightarrow 0$ (si politique temporaire).

Blocs SS :

$$\hat{s} = \frac{\bar{\xi} \hat{Y}}{1 - \frac{1-\delta_e}{\gamma}} = \bar{\xi} \hat{Y} \frac{\gamma}{\delta_e + g}, \quad d = Be^{-\phi(\hat{s} - \bar{s})}$$

$$\hat{Y} = d \tilde{A}^{\frac{1}{1-\alpha}} \left(\frac{\alpha(1-\tau^y)}{R} \right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} L, \quad \frac{\hat{I}}{\hat{Y}} = \eta = \frac{\hat{K}}{\hat{Y}} \frac{g+\delta}{\gamma}, \quad \hat{Y} = \hat{C} + \hat{I} + \hat{G} + \hat{\Psi}.$$

Lambert W : fermeture analytique (intuition)

Au SS (stationnarisé), la boucle impose :

$$\hat{Y} = d(\hat{s}) \hat{y}_g, \quad d(\hat{s}) = Be^{-\phi(\hat{s}-\bar{s})}, \quad \hat{s} = \kappa \hat{Y}, \quad \kappa = \frac{\bar{\zeta} \gamma}{\delta_e + g}.$$

Donc

$$\hat{Y} = \underbrace{Be^{\phi\bar{s}} \hat{y}_g}_{\equiv C} \exp(-\phi\kappa \hat{Y}).$$

En posant $Z = \phi\kappa \hat{Y}$:

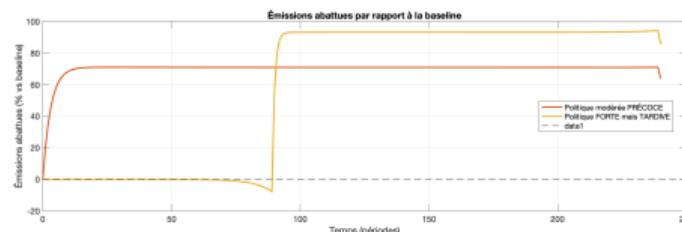
$$Ze^Z = \phi\kappa C \Rightarrow Z = W(\phi\kappa C), \quad \hat{Y} = \frac{1}{\phi\kappa} W(\phi\kappa C).$$

Gain : on isole \hat{Y} malgré sa présence dans l'exponentielle.

Messages-clés

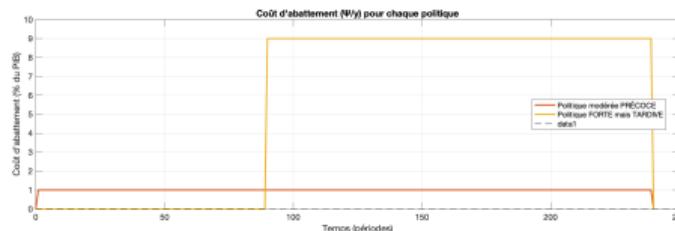
- L'abattement μ_t agit comme une **amélioration d'efficacité énergétique** coûteuse (Ψ_t).
- À long terme, $\xi \downarrow \Rightarrow s \downarrow \Rightarrow d \uparrow \Rightarrow y \uparrow$: **gain net** si la politique n'est pas trop coûteuse.

Courbe marginale d'abattement



Lecture du graphique :

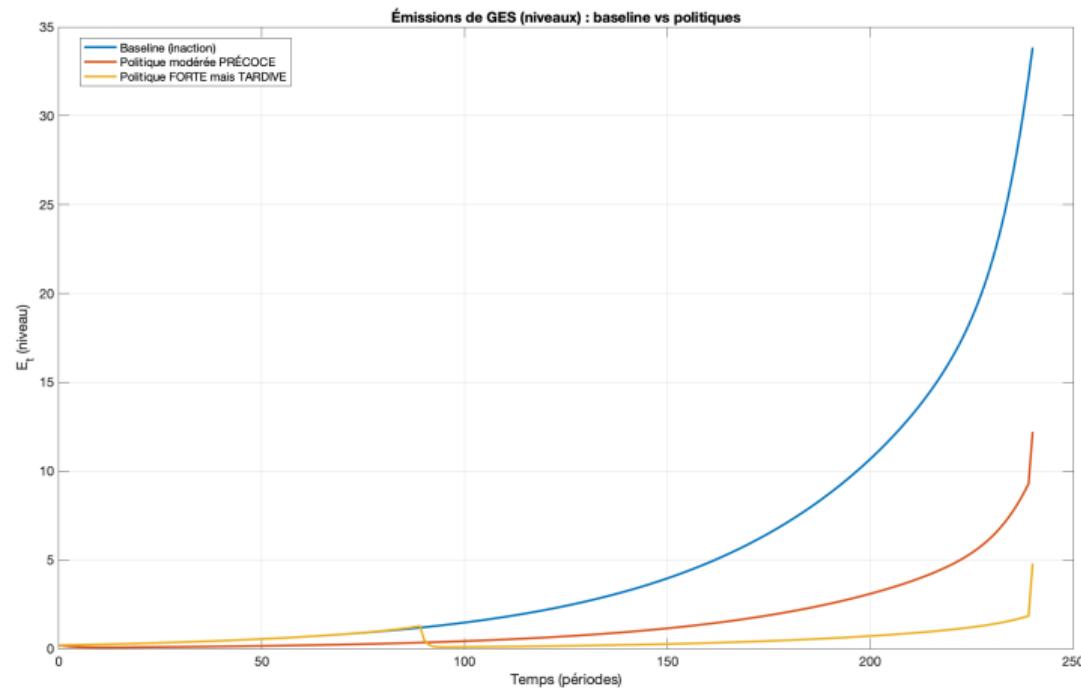
- L'axe vertical :
 - la baisse des émissions,
 - le coût marginal $\chi \mu_t y_t$
- **Baseline** : $\mu_t = 0$
⇒ pas de coût d'abattement, mais émissions maximales.



Trois scénarios : baseline (inaction), politique modérée précoce, politique forte tardive.

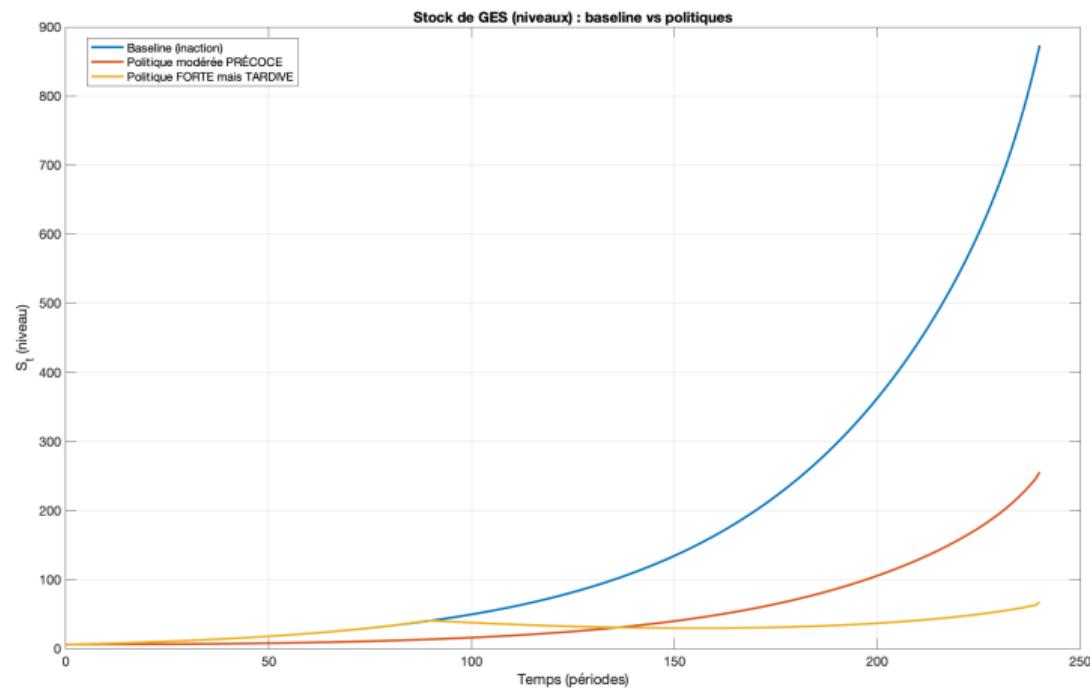
Émissions de GES : baseline vs politiques climatiques

Émissions de GES E_t



Stock atmosphérique de GES : baseline vs politiques climatiques

Stock de GES S_t



Merci beaucoup pour votre attention!