
Compte rendu final :
Couplage de modèles à l'aide du formalisme
TEF/ZOOM
Analyse des interactions entre le climat et l'économie

1 Introduction

L'étude des influences réciproques de l'environnement et des sociétés humaines est le thème central de ce projet de recherche et de projets de recherche européens (ENSEMBLES). Ces études font apparaître de difficiles problèmes méthodologiques portant sur le contrôle scientifique des résultats et la compréhension des mécanismes sous-jacents.

Ces études conduisent à mettre en oeuvre des modèles pour analyser les influences croisées entre le système climatique et le système socio-économique. La difficulté de l'exercice tient aux forts degrés de complexité intrinsèque de chacun des domaines et à la nature profondément différente des objets mis en jeu (en particulier en ce qui concerne le temps, la modélisation des comportements humains et la prise en compte de l'incertitude). Il n'est déjà pas facile d'établir un niveau de simplification pertinent dans un champ disciplinaire homogène ; la difficulté est ici accrue puisque nous sommes confrontés à des champs disciplinaires basés sur des approches, des concepts et des méthodes radicalement différents.

Il a été choisi de mettre l'accent sur les interfaces entre les différents processus. Ceci a l'avantage de placer au centre de la problématique les éléments par lesquels passent les inter-influences. Toutefois, la définition des interfaces entre les systèmes climatiques et économiques est rendue difficile par la différence des échelles spatiales et temporelles impliquées, par la multiplicité des modes d'influence réciproque entre ces systèmes, et par les différences conceptuelles entre les modèles physiques et les modèles économiques.

En particulier, il est très important de pouvoir simuler de façon correcte l'évolution du système et, en outre, d'avoir la capacité d'évaluer sa sensibilité :

- à chacun des paramètres incertains (par exemple les gains futurs de productivité) ;
- à chacun des éléments sur lesquels les sociétés humaines exercent une influence directe (par exemple la surface cultivée ou la déforestation)

- et enfin d’analyser les réponses du système à des chocs, ces chocs pouvant être issus du système climatique (une bifurcation comme un arrêt de la circulation thermohaline), du système économique (limite de rentabilité de certaines activités), ou provenir d’un choix politique (modification brutale de la politique énergétique).

Les débats liés au problème du changement climatique ont montré que l’aspect temporel des réponses à ces chocs est une des clés de l’efficacité de décisions politico-économiques visant à s’adapter ou à prévenir des dommages liés aux évolutions du système global. C’est pourquoi la connaissance des temps caractéristiques inhérents à des processus naturels élémentaires et aux actions politiques envisageables est nécessaire à la prospective et à la décision publique.

Notre contribution à la première étape du programme GICC-1 avait permis une interprétation des gains de rétroaction pour décrire une sensibilité à une perturbation ou un choc. On verra comment cette démarche nous a ensuite conduit à travailler sur l’aspect dynamique d’une réponse aux chocs dans les systèmes climatiques et économiques.

2 TEF/SLT/ZOOM

Ces travaux utilisent TEF/ZOOM, une méthode de raccordement déjà utilisée dans les domaines des Sciences de l’Ingénieur et de la Climatologie (couplage océan/atmosphère). Elle permet la conception et l’analyse de modèles de complexité intermédiaire (c’est-à-dire ne dépassant pas quelques milliers d’équations). Elle offre la possibilité, en parallèle aux simulations au fil du temps, d’analyser la dynamique de la réponse à des chocs, de quantifier les dépendances réciproques des éléments du modèle, et de caractériser dynamiquement les boucles de rétroaction présentes dans le système.

SLT SLT

3 Modèle climatique simplifié : approche en termes de boucle de rétroaction

La problématique du changement climatique fait intervenir des modèles dans lesquels l’établissement de relations de causalité entre les variables est difficile. Pour contourner cette difficulté, le rapport IPCC-2001 tente de décrire le fonctionnement de la machine climatique sous forme de boucles de rétroaction, qui permettent de décrire sobrement la réponse d’un système complexe pour en dégager et

comprendre les mécanismes essentiels. Cependant les méthodes usuelles d'analyse de rétroactions ignorent les aspects dynamiques, lesquels restent jusqu'à présent difficiles à appréhender et donc mal compris.

Un modèle simplifié de la rétroaction vapeur d'eau a ainsi été construit et a servi à une étude des temps caractéristiques de cette rétroaction. Cela a conduit à aborder les boucles de rétroaction suivant une approche dynamique permettant de prendre en compte la partie transitoire de la trajectoire et les temps caractéristiques de ces processus.

3.1 Boucle de rétroaction

Une boucle de rétroaction est définie comme un ensemble de processus, reliés par des variables de transfert $\{\delta\varphi_i, i=1, \dots, n\}$, dans lequel l'évolution de chaque variable $\delta\varphi_j$ ne dépend que de $\delta\varphi_{j-1}$.

Suivant le formalisme proposé par Bode (1945) en électronique, une rétroaction est classiquement caractérisée par son gain (g) défini par :

$$(1 - g) \cdot \delta\varphi_1^\infty = \delta\varphi_1^0 \quad (1)$$

où :

- $\delta\varphi_1^\infty$ est la variation de la valeur d'équilibre de φ_1 quand une perturbation dans le forçage a été imposée ;
- $\delta\varphi_1^0$ est la variation de la valeur d'équilibre de φ_1 pour la même perturbation, mais en l'absence de rétroaction (*i.e.* le lien entre 2 variables de la boucle a été coupé).

Le gain de rétroaction est donc défini par la différence entre deux équilibres, et sera appelé dans la suite le *gain statique* de la rétroaction.

Cependant, les processus engagés dans une rétroaction sont très lents, le temps nécessaire pour atteindre le nouvel équilibre sera long. De plus, *la trajectoire transitoire entre deux équilibres peut être un point clé pour comprendre le rôle et l'influence d'une rétroaction sur le reste du système*. Il nous a donc paru nécessaire de décrire les rétroactions et leur dynamique de façon plus précise.

3.2 Caractérisation dynamique d'une rétroaction

L'analyse de la dynamique d'une rétroaction est faite ici à l'aide du système linéaire tangent (SLT) au modèle étudié. Comme le modèle est non-linéaire, le SLT évolue au cours du temps. Nous restreignons donc l'étude aux cas de variations faibles autour d'un état d'équilibre stable. Dans ce cas, le SLT reste valide sans limite de temps.

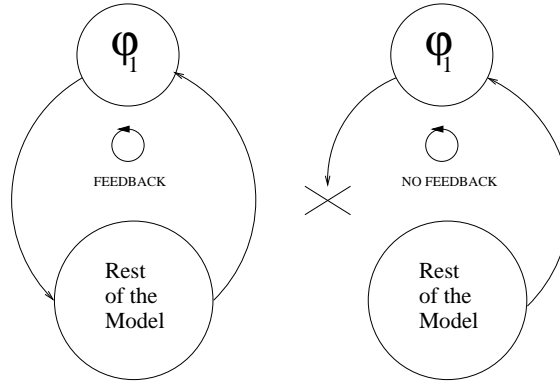


FIG. 1 – Schema de la rétroaction (gauche) and illustration du modèle en boucle ouverte (droite).

L'étude est basée sur le fait que les pôles de la transformée de Laplace (ou de Borel) des solutions d'un système linéaire donnent la dynamique complète du système étudié. Le principe est donc de calculer la transformée de Borel du SLT, et d'éliminer du système obtenu toutes les variables à l'exception d'une seule, par exemple $\delta\varphi_1$. On obtient une équation de la forme :

$$(1 + \mathcal{C}'_{11}(\tau)) \cdot \mathcal{B}[\delta\varphi_1](\tau) = \mathcal{B}[\delta\varphi'_{1ins}](\tau) \quad (2)$$

où :

- τ est la variable de Borel (qui a la dimension d'un temps) ;
- $\delta\varphi_1$ est la variation de φ_1 prédite par le SLT ;
- $\delta\varphi'_{1ins}$ est la variation de φ_1 prédite par le SLT quand la boucle de rétroaction est coupée juste après φ_1 dans la Figure 1.

Donc $\mathcal{C}'_{11}(\tau)$, ou plutôt $g_1(\tau) = -\mathcal{C}'_{11}(\tau)$, représente donc l'effet de la fermeture de la boucle.

Contrairement au gain statique, le *gain dynamique* g_1 est une fonction de τ et il relie la dynamique du modèle à boucle fermée à la dynamique du modèle à boucle ouverte. Une transformée de Borel inverse donne la réponse temporelle de la variable choisie, en fonction de sa réponse dans un modèle sans rétroaction :

$$\delta\varphi_1(t) = \mathcal{B}^{-1} \left[\frac{1}{1 - g_1(\tau)} \right] * \frac{d}{dt} \delta\varphi_{1ins}(t) \quad (3)$$

On remarque que le gain dynamique généralise la notion de gain statique puisque :

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} \mathcal{B}^{-1}[g_1(\tau)](t) = \lim_{\tau \rightarrow +\infty} [g_1(\tau)] = g \quad (4)$$

4 Application à la rétroaction vapeur d'eau

Il est communément admis que la rétroaction par la vapeur d'eau atmosphérique est un phénomène clé lié à l'augmentation de l'augmentation du gaz carbonique atmosphérique.

Un modèle global, unicolonne, ayant 30 variables thermiques et 40 variables radiatives a été construit de façon à reproduire une des définitions possibles de la rétroaction vapeur d'eau. La boucle est la suivante :

- il y a une augmentation de la température troposphérique ;
- l'humidité relative est réduite (Clausius-Clapeyron) ;
- les précipitations étant modélisées comme un processus tendant à maintenir un niveau fixé d'humidité relative, les précipitations deviennent inférieures à l'évaporation ;
- l'humidité relative retourne à son niveau initial, correspondant à une plus grande humidité absolue ;
- le bilan radiatif est modifié et l'augmentation de température troposphérique est amplifiée.

Le modèle a été validé par confrontation à des résultats de GCM soumis à une augmentation de la concentration de CO₂.

On définit le *gain dynamique*, $\delta F_T(t)$, comme l'augmentation supplémentaire de température troposphérique causée par la rétroaction, après qu'un choc (une augmentation soudaine) de 1K a été appliquée. Il s'écrit :

$$\delta F_T(t) = \left(\mathcal{B}^{-1} \left[\frac{1}{1 - g_{wv}(\tau)} \right] - 1 \right) \cdot (1 \text{ K}) \quad (5)$$

Dans ce modèle on trouve :

$$\delta F_T(t) = -0,56 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}) + 1,17 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau_2}}) \quad (6)$$

avec $\tau_1 = 7$ jours et $\tau_2 = 7,7$ années. On trouve donc un pôle rapide et un pôle lent.

Le pôle rapide est une rétroaction négative, qui provient de la réduction du flux de chaleur latente, car les précipitations sont inférieures à l'évaporation pendant la période transitoire. Son gain dynamique est de +0.5 (elle divise par 2 le réchauffement initial). Cette composante est stabilisatrice : quand une modification de forçage mène à un réchauffement de la SST et de l'atmosphère, la quantité d'eau que l'atmosphère peut contenir augmente (l'humidité relative diminue). Alors, une différence entre l'évaporation et les précipitations mène à une augmentation de l'humidité absolue (l'humidité relative retrouve son niveau initial). Cette différence entre évaporation et précipitations consomme de l'énergie latente et refroidit le système.

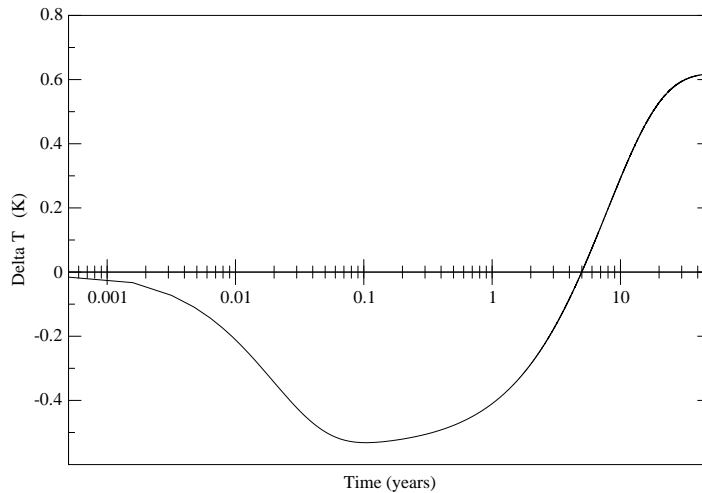


FIG. 2 – Gain dynamique de la rétroaction vapeur d'eau

Le pôle lent correspond à ce que l'on appelle habituellement la rétroaction vapeur d'eau. Son temps caractéristique est de 7,7 ans, ce qui peut être expliqué par le fait que cette rétroaction est composée d'une chaîne de processus de temps caractéristiques non-nuls : un réchauffement mène (en un temps non-nul) à une augmentation de la quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère, qui mène à son tour (en un temps non-nul) à un réchauffement supplémentaire, et ainsi de suite.

La deuxième composante est la rétroaction vapeur d'eau classique, positive et de long terme (temps caractéristique 7 ans, facteur de rétroaction +2.17) : la vapeur d'eau supplémentaire contenue dans l'atmosphère modifie le flux radiatif et réchauffe un peu plus le système.

L'effet de cette deuxième composante est largement supérieure à l'effet de la première composante. Si l'on ne considère que l'équilibre, on aboutit à un effet très positif de la rétroaction vapeur d'eau (avec un facteur de rétroaction de +1.6).

Le pôle positif de la rétroaction est largement supérieur en intensité au pôle négatif. En conséquence, le gain statique est positif : $g_{WV}^{\infty} = 38\%$.

Influence sur la variabilité naturelle : On peut montrer que si un système est soumis à une perturbation périodique de période T , seules les rétroactions de temps caractéristique inférieur ou du même ordre que T peuvent intervenir. En conséquence,

face à une perturbation de période courte, seul le pôle rapide (et négatif) de la rétroaction vapeur d'eau peut agir : la rétroaction vapeur d'eau est donc stabilisatrice pour les échelles de temps courtes. Par contre, face à une perturbation de période longue, les deux pôles de la rétroaction jouent et le plus important l'emporte : la rétroaction vapeur d'eau est donc déstabilisatrice pour des échelles de temps longues.

L'effet de la rétroaction vapeur d'eau sur la variabilité naturelle est la suivante : pour des perturbations de longueur d'onde courte (inférieure à 1 an), seul la composante rapide de la rétroaction peut jouer, et la rétroaction vapeur d'eau est stabilisante : elle réduit l'amplitude de la variabilité. Pour des perturbations de longueur d'onde longue (supérieure à 1 an), les deux composantes peuvent jouer et la plus importante l'emporte : la rétroaction vapeur d'eau est alors déstabilisatrice et elle augmente l'amplitude de la variabilité.

Cette approche du gain dynamique développée dans le cadre d'un modèle climatique peut être étendue à l'économie.

5 Approche de l'interface économie-climat : caractérisation de la rétroaction économie-climat dans un modèle climat 0D couplé à un modèle macroéconomique agrégé

On a appliqué la technique qui a permis de mettre en évidence la structure temporelle complexe de la rétroaction vapeur d'eau. Nous modélisons la rétroaction économie-climat à l'aide de 4 modules :

- le module climatique utilisé dans la partie précédente ;
- un module macro-économique standard ; extrêmement simple (1 secteur, 1 pays, fonction de production de Cobb-Douglas, taux d'épargne constant)
- un module pour les émissions ;
- et un module pour les impacts. Deux types d'impacts sont pris en compte : un impact direct sur la productivité, et un impact indirect sur la durée de vie du capital. La réduction de la durée de vie du capital représente simultanément la perte en capital liée à son inadaptation, la perte liée aux événements extrêmes, et la perte liée à l'adaptation, qui impose un remplacement prématuré du capital installé.

L'adaptation est prise en compte, et peut-être plus ou moins rapide et plus ou moins efficace. L'originalité principale vient du module d'impact, qui suppose l'existence d'un temps nécessaire à l'adaptation, et pas seulement d'une capacité absolue d'adap-

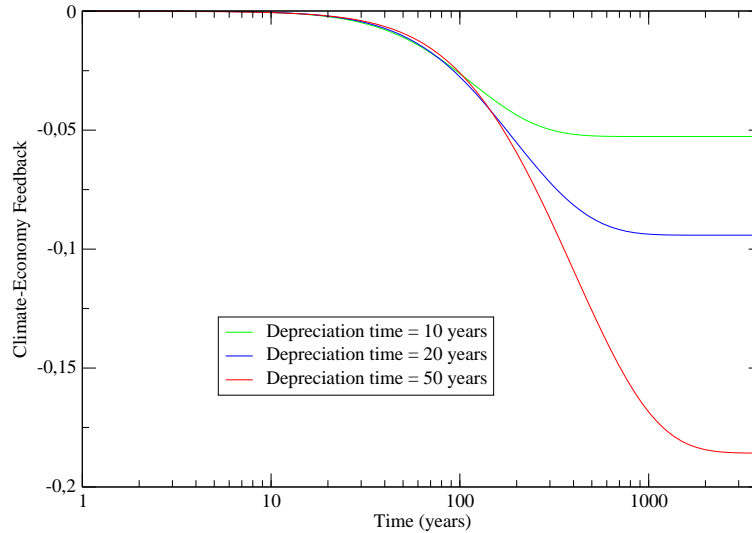


FIG. 3 – Gain dynamique de la rétroaction économie-climat pour différents temps caractéristiques de l'économie (dépréciation du capital)

tation.

Le gain dynamique de la rétroaction économie-climat est ici défini comme la modification supplémentaire des émissions due à la rétroaction économie-climat, si les émissions augmentent soudainement de 1 GtC :

$$\delta F_E(t) = -1,1 \cdot 10^{-1} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}) + 2,6 \cdot 10^{-2} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau_2}}) \quad (7)$$

pour un temps de dépréciation de 20 ans (???) et avec $\tau_1 = 89,0$ années et $\tau_2 = 18,6$ années. Ceci correspond à un gain dynamique de 0,92 et à un gain statique de -9,2%.

Cette rétroaction peut être exprimée en terme de production : si la production annuelle est augmentée d'un montant donné, environ 9% de cette augmentation sera perdue à terme à cause du changement climatique supplémentaire créé par cette production supplémentaire. En d'autres termes, chaque point de croissance mondiale actuelle ne devrait correspondre qu'à 0,9% de croissance, à cause du changement climatique **additionnel** lié à cette croissance.

Les 89 ans de temps caractéristique montrent l'inertie des système mis en jeu et donnent une idée des horizons temporels qu'il est nécessaire d'envisager : un siècle de simulation ne permet pas de prendre en compte la dynamique de l'interaction dynamique climat-économie.

La figure montre que pendant les premières cinquante années, le système ne peut différencier entre les dommages sur des équipements pour lesquels les temps de dépréciation du capital sont très différents. Un tel résultat peut s'expliquer par le fait que ce modèle simplifié ne prend en compte qu'un seul secteur et la variable pertinente est le rapport flux/stock qui est très faible. (Il faut donc mettre en place un modèle plus désagrégé pour tirer des conclusions plus quantitatives.

De plus, on ne peut rien attendre d'une auto-régulation par les dommages : si les dommages sont importants, seule une politique de réduction d'émissions permettrait de les éviter.

Une analyse de sensibilité montre que le temps caractéristique de cette rétroaction ne dépend pas du niveau absolu des impacts. Il s'agit donc d'une information robuste sur ce point. Par contre, elle dépend largement du temps d'adaptation choisi. Le choix de ce temps d'adaptation est donc très important : prendre un temps caractéristique d'adaptation de 250 ans au lieu de 100 ans, est équivalent à doubler le niveau absolu des impacts.

Une définition rigoureuse de l'objet "rétroaction économie-climat" est donnée, dans le cas particulier de ce modèle simple.

On montre que les résultats en terme de PIB, ou de toute autre valeur agrégée, peuvent cacher des chocs transitoires violents. Le PIB ne semble donc pas être la variable dont l'étude est la plus pertinente. L'étude est donc faite en terme de croissance annuelle, qui permet de mieux appréhender les chocs.

La rétroaction économie-climat est négative, avec un gain dynamique compris entre 0.82 et 0.95 selon les hypothèses retenues sur les impacts et l'adaptation.

Le temps caractéristique de la rétroaction économie-climat est d'environ 90 ans, et est peu sensible à une modification du niveau absolu des impacts. Ceci montre qu'il ne peut y avoir d'auto-régulation du changement climatique par les dommages, quels que soient leur niveau.

Le temps caractéristique de l'adaptation modifie significativement le temps caractéristique de la rétroaction ainsi que son intensité : doubler l'inertie de l'adaptation est ici équivalent à doubler le niveau des impacts.

6 Conclusions

Une approche par boucles de rétroaction a été proposée pour décrire la problématique du changement climatique et de l'interaction économie-climat. Concernant des modèles complexes et fortement couplés, il semble que cette approche permette de proposer des descriptions intelligibles du fonctionnement des systèmes et des informations robustes sur sa dynamique.

En particulier, la description de la rétroaction vapeur d'eau met en évidence la présence de deux rétroactions, l'une rapide, faible et négative, l'autre lente, forte et positive. Des conséquences sur la variabilité naturelle en sont déduites.

La modélisation de la rétroaction économie-climat permet de décrire ces interactions d'une façon originale et rigoureuse. Les temps caractéristiques proposés sont également des informations intéressantes pour la conception d'expériences de simulation avec des modèles de grande complexité.

Importance d'avoir des outils pour aborder le problème des chocs

le changement climatique est un phénomène progressif avec des chocs plus ou moins importants

Les débats liés au problème du changement climatique ont montré que l'aspect temporel des réponses

7 Colloque de Mars

Colloque organisé pour faire connaître le formalisme TEF et le logiciel ZOOM aux principaux chercheurs européens engagés sur la problématique de la modélisation intégrée. Le programme de la journée ainsi que la liste des participants sont indiqués en annexe.

Rachel Warren (Tndall Center) Arthus Beusen (RIVM) Bas Eickout (RIVM) Tom Kram (RIVM) Claudia Kempfert (Univ. Oldenburg) Francesco Bosello (FEEM) Sander van der Leeuw (INSU/CNRS) Jean-Louis Joly (LESETH) Stéphane Blanco (LESETH) Vincent Platel (LESETH) Brian O'neill (IIASA) Richard Fournier (LESETH)

CONTRIBUTION OF TEF-ZOOM TO INTEGRATED MODELLING Tentative program

9h00-9h05 : Introduction (Jean-Charles Hourcade) 9h05 - 9h15 : The Tef-Zoom 'history' (Jean-Yves Grandpeix) 9h15 - 10h15 : the TEF approach : theory and method 10h15 - 10h30 : questions and clarifications 10h30 - 11h : break 11h - 12h30 : An overview of TEF potential uses through TEF-ZOOM applications among :

- simple climate model and water feedbacks (Stéphane Hallegatte)

- use of TEF to understand the result of 'non-TEF' = models (Jean-Louis Dufresne)

- economic examples (Venance Journé /Stéphane= Hallegatte)

12h30 - 14h : Lunch at Cired

14h - 14h45 : Discussions and required clarifications

14h45 - 15h : break

15h - 16h : Discussion : integrated modelling framework and TEF.= short term possibilities and long term prospects.

16h - 17h : Discussion : technical conditions of collaboration ; setting up further steps.