

**Interactions d'échelles en économie :  
Application à l'évaluation des dommages économiques  
du changement climatique et des événements extrêmes.**

S. Hallegatte

Thèse pour l'obtention du titre de docteur de l'EHESS.  
Discipline : Economie de l'Environnement

Sous la direction de Jean-Charles Hourcade

Les principaux résultats de mon travail de thèse permettent d'éclairer la fragilité des modèles utilisés dans l'évaluation des dommages économiques du changement climatique. En effet, les modèles économiques de long terme (Solow, 1956 ; Nordhaus, 1994) supposent que l'on peut négliger les processus de plus court terme pour modéliser le long terme et que l'on peut considérer, pour ces problèmes, que l'économie est toujours à l'équilibre. De nombreux auteurs (dont Solow, 1988 et Arrow, 1989) ont cependant fait remarquer que l'existence d'un tel équilibre était peu probable, et que les modèles de croissance étaient incapables de faire le lien entre les fluctuations de court terme - les cycles économiques par exemple - et les tendances de long terme.

De plus, principalement à cause de la variabilité naturelle du climat, une grande partie des impacts du changement climatique ne passera probablement pas par une décroissance continue et régulière de la productivité, qui pourrait dès lors s'intégrer facilement dans le cadre des théories de la croissance. Ces impacts se feront plus probablement sentir par des franchissements de seuils et des événements extrêmes. Pour pouvoir représenter ces effets dans un modèle de croissance, il faudrait pouvoir les moyenniser dans l'espace et dans le temps. Mais a-t-on le droit de moyenniser ces effets de court terme sans prendre en compte leur distribution temporelle ? Ou bien les interactions entre les petites et les grandes échelles rendent-elles cette stratégie inadéquate ? Le diagnostic initial qui motive cette thèse est que cette question n'a pas été posée de façon suffisamment rigoureuse par les évaluations de dommages publiées jusqu'ici.

---

Il nous semble que les résultats de cette thèse ont largement confirmé ce diagnostic en montrant sur plusieurs points distincts que le jeu des échelles temporelles était essentiel mais toujours mal compris et mal pris en compte par les études existantes.

Ainsi, on a commencé par une analyse d'un processus climatique, les modèles climatiques étant par construction capables de reproduire une large gamme d'échelles temporelles, ce qui n'est pas le cas des modèles économiques. On s'est donc intéressé à la réponse du cycle hydrologique au forçage anthropique et à la caractérisation de la rétroaction vapeur d'eau. On a trouvé que l'interaction de processus simples et rapides mène à une dynamique complexe et de long terme. En particulier, la rétroaction vapeur d'eau, qui augmente de plus de 50% le réchauffement dû au CO<sub>2</sub>, a besoin de près de 10 ans pour être complètement active et, pendant plusieurs années, elle est négative à cause de l'effet des variations de court terme des précipitations. Ceci nous a permis de démontrer, dans le cadre du système climatique, qu'il est essentiel de s'intéresser aux processus rapides pour comprendre les réponses de long terme, et de proposer une méthodologie d'analyse dynamique des rétroactions. Cette méthodologie a ensuite été utilisée pour étudier les temps caractéristiques de la

rétroaction économie-climat, dans un modèle intégré dont le cœur est un modèle de croissance équilibrée de long terme, à la Solow.

En utilisant ce modèle de croissance, qui néglige les phénomènes de court terme, on a mis en évidence la longueur des temps caractéristiques de cette rétroaction : la rétroaction économie-climat laisse apparaître deux temps caractéristiques, un autour de 30 ans et un autour de 80 ans. On a trouvé qu'une action sur les émissions n'a aucun impact en retour sur l'économie pendant 20 ans, et qu'elle exprime principalement ses effets 80 ans après avoir été engagée. Même une actualisation des dommages à des taux de 1 à 3% ne permet alors pas de les négliger sur le très long terme, au-delà du siècle.

Il est donc nécessaire d'évaluer les dommages sur le très long terme pour conduire des analyses coût-bénéfice, ce qui représente un obstacle majeur. La caractérisation dynamique de la rétroaction économie-climat a également permis de justifier la méthode de l'IPCC qui consiste à négliger la rétroaction des impacts du changement climatique sur les scénarios d'émissions jusqu'en 2100. On a trouvé que cet horizon était trop rapproché pour permettre à la rétroaction de modifier de manière significative les émissions, d'autant plus que l'essentiel des impacts est attendu après 2050. D'autres limitations des évaluations de dommages semblent bien plus prioritaires. La méthode de l'IPCC est donc justifiée par la simplification que permet le découpage du problème en sous-problèmes indépendants.

Cette première analyse des interactions entre le climat et l'économie a également mis en évidence l'insuffisance des modèles de croissance de long terme pour représenter les dommages du changement climatique.

---

Pour illustrer ces lacunes, on a regardé d'abord comment les stratégies d'adaptation, qui se construisent sur le court et moyen terme dans un contexte très incertain, sont responsables de verrouillages sur le long terme, qui influencent la croissance et le bien-être. On a pour cela utilisé une méthode originale, par *analogues climatiques*, qui permet à la fois de nourrir la réflexion sur l'adaptation mais aussi de donner un sens accessible aux prédictions des modèles climatiques. En effet, il est difficile, en particulier pour les non-spécialistes, de se représenter ce que signifie un réchauffement de quelques degrés de la température moyenne. Par exemple, le modèle du *Hadley Centre* prédit une augmentation de 3°C en 100 ans de la température moyenne à Paris. Est-ce grave ? Pour répondre à cette question, on recherche une ville qui a aujourd'hui un climat comparable au climat futur que le modèle prédit pour Paris à la fin du siècle. Pour ce modèle, on trouve ainsi que le climat de Paris en 2100 ressemble fortement au climat actuel de Cordoue, dans le sud de l'Espagne. En comparant ces deux villes, on imagine facilement ce que représente le changement climatique en terme de modification des conditions de vie, en terme d'adaptation de l'urbanisme, de l'architecture des habitations, de système énergétique, de gestion des eaux...

On peut ensuite généraliser cette approche à plusieurs villes et à plusieurs modèles pour obtenir la figure 1, qui représente un certain nombre de villes européennes à l'endroit qui a aujourd'hui un climat proche de celui qu'elles auront à la fin du siècle. On constate aisément que le changement climatique constitue une modification radicale des conditions de vie. La comparaison des résultats pour deux modèles permet en outre de se donner une idée de l'incertitude qui pèse sur ces prédictions. Ces cartes permettent donc au non-spécialiste de se faire idée de l'ampleur du changement qui nous attend et de l'incertitude qui subsiste sur ses conséquences.

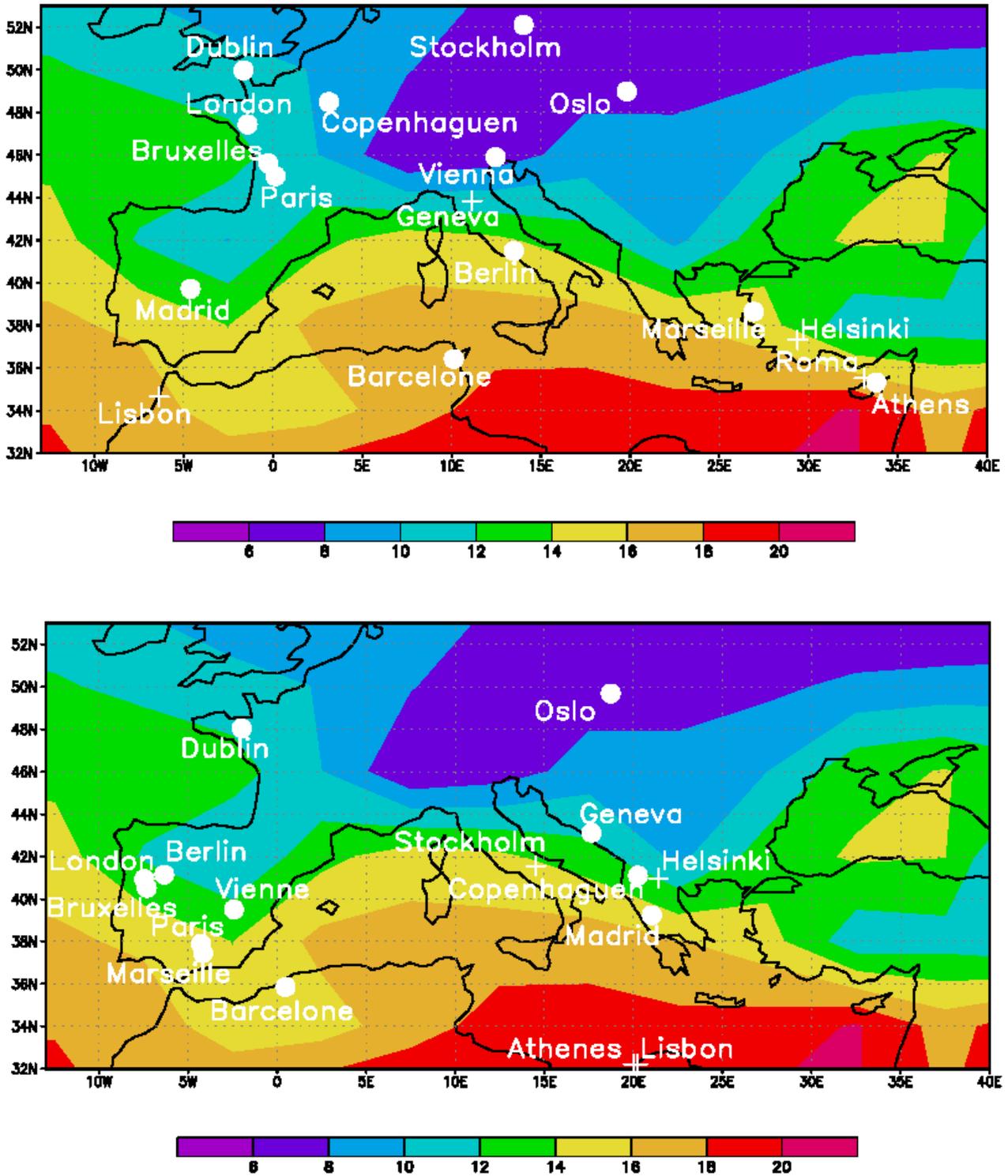


Figure 1 : Carte de l'Europe et du bassin Méditerranéen. Les villes sont représentées par des cercles à la position de leur analogue climatique, *i.e.* à l'endroit qui a aujourd'hui un climat proche de celui qu'elles auront à la fin du siècle, d'après les modèles climatiques. Quand aucun analogue acceptable n'a été trouvé, une croix représente la position du meilleur analogue en termes de température seulement, en négligeant les précipitations. La carte du haut est pour le modèle ARPEGE-Climat, celle du bas pour le modèle du Hadley Centre.

Intuitivement, certains pourraient se réjouir de vivre dans le futur sous un climat plus chaud et plus sec. Pourtant, il faut garder à l'esprit qu'un été qui aurait été « normal » à Cordoue a provoqué plus de 15.000 décès en France en 2003 : le besoin d'adaptation aux nouvelles conditions climatiques sera probablement immense. Or, les bâtiments, les infrastructures et les systèmes électriques ont des durées de vie importantes et représentent une part importante du capital installé. Eviter une mauvaise adaptation de ces secteurs aux conditions climatiques, et donc une mauvaise allocation du capital, demande donc une anticipation des investissements qui reste hors de portée à cause de l'incertitude sur le réchauffement futur. Nous en concluons que les dommages du changement climatique sont autant liés à l'incertitude sur le réchauffement qu'au réchauffement en lui-même et que, à l'instar de nos décisions de réductions d'émissions, les décisions concernant l'adaptation dans les prochaines décennies vont nous engager sur le long terme.

---

On s'est intéressé ensuite aux couplages entre la dynamique économique de court terme et les tendances de long terme en se concentrant sur les conséquences des événements extrêmes.

Deux interprétations des fluctuations économiques existent dans la littérature : une approche à la Kydland et Prescott (1982) pour qui les fluctuations économiques viennent de chocs exogènes et une approche à la Goodwin (1951) pour qui elles viennent d'instabilités endogènes au système économique. On a donc proposé un cadre de modélisation capable de reproduire ces deux interprétations.

Dans une situation à la Kydland et Prescott (1982) où l'économie possède un équilibre stable, on a montré que la prise en compte de processus de court terme, comme l'impact des catastrophes sur le stock de capital et la limitation des moyens qu'une économie est capable de mobiliser pour la reconstruction, augmente d'un facteur 2 le coût macroéconomique total d'une distribution réaliste d'événements extrêmes climatiques. La forte dépendance des coûts totaux à la capacité de reconstruction illustre en outre que l'évaluation des dommages économiques d'un changement climatique ne dépend pas seulement d'hypothèses sur le climat futur, mais aussi d'hypothèses sur l'organisation future du système économique.

On montre également que ces processus de court terme peuvent mener à des bifurcations des trajectoires de long terme quand la fréquence ou l'intensité des événements extrêmes excèdent les capacités de reconstruction des économies. La figure 2 montre que, pour une valeur fixée d'un paramètre de la distribution des événements extrêmes (ici noté  $\alpha$ ), les coûts sont limités si la capacité de reconstruction (ici  $f_{\max}$ ) est supérieure à un certain seuil. Si elle est inférieure à ce seuil, les dommages augmentent très brutalement. Or, les caractéristiques des extrêmes seront fortement modifiées au cours de ce siècle, que ce soit par le changement climatique ou par une probable redistribution des implantations humaines. Ceci suggère que le changement climatique pourrait appeler une adaptation du système économique, permettant d'augmenter notre capacité à reconstruire rapidement après une catastrophe. On peut imaginer la généralisation de fonds publics tels que le *Florida Hurricane Catastrophe Fund* ou le système *Cat-Nat* en France ; ou des modifications des normes de régulation du secteur de l'assurance (exemple du *Solvency package* proposé par la Commission Européenne).

On note par ailleurs que ce formalisme propose une explication au manque de développement économique de certains pays pauvres frappés particulièrement fréquemment par des catastrophes naturelles (par exemple le Guatemala) : parce que les contraintes de financement sont très fortes

dans ces pays, ils ne sont pas capables de reconstruire leurs infrastructures suffisamment rapidement pour faire face à des séries de catastrophes. Ils ne sont donc pas en mesure d'accumuler les infrastructures nécessaires à leur développement économique. On peut donc imaginer qu'il existe un seuil de développement au delà duquel ces économies deviendrait robustes à ces catastrophes.

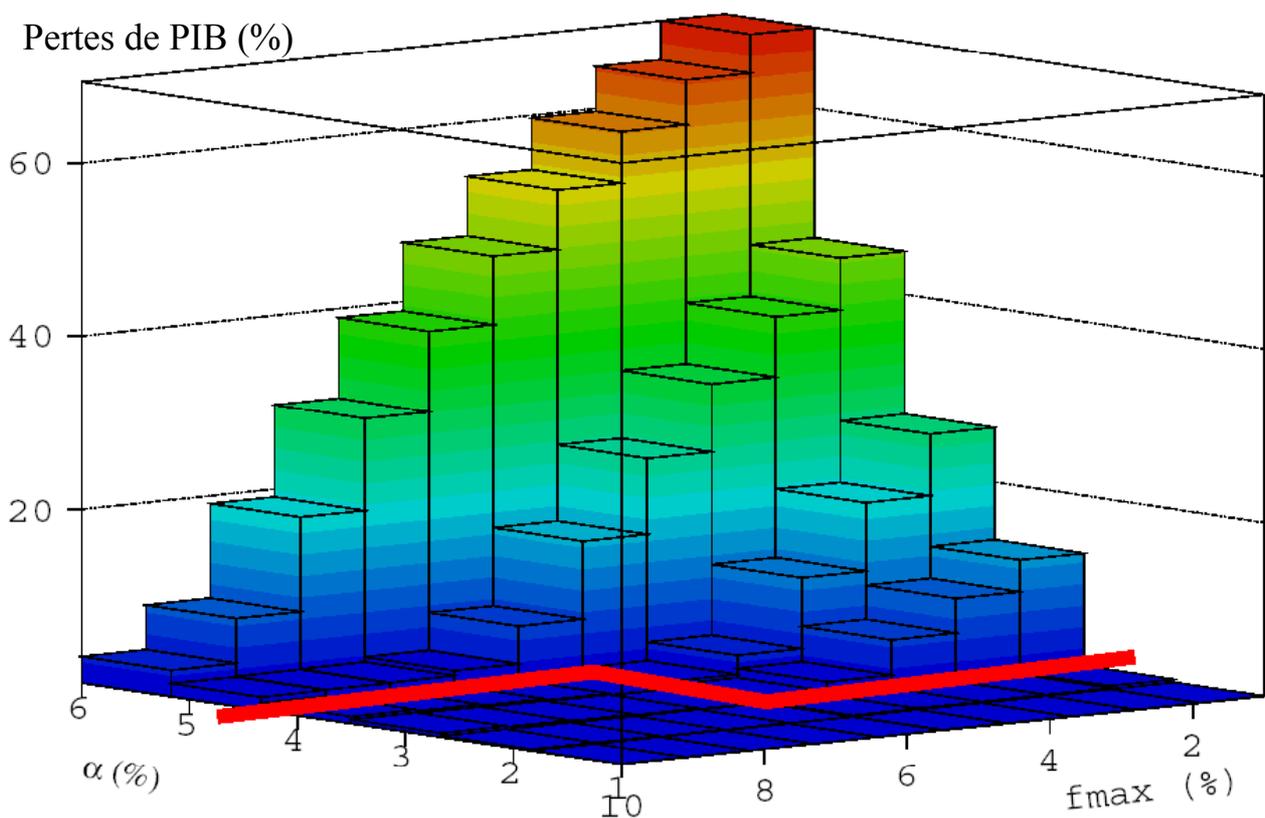


Figure 2 : Pertes moyennes de PIB dues aux événements extrêmes, après 100 ans, en pourcentage du PIB, en fonction de la capacité de l'économie à reconstruire après une catastrophe ( $f_{max}$ , en %) et à un des paramètres de la distribution des événements extrêmes ( $\alpha$  en %). Quand  $\alpha$  vaut 2, la fréquence des événements extrêmes est multipliée par deux, et leur coût moyen est multiplié par deux. La ligne rouge sépare les jeux de paramètres pour lesquels les pertes sont inférieures à 1% du PIB.

On a ensuite proposé une modélisation des cycles économiques, dans laquelle les fluctuations viennent de l'instabilité intrinsèque de la relation entre l'investissement, la demande et les profits, contrainte par la disponibilité du travail et par l'inertie de la production. Dans ce cadre, l'économie a un équilibre stable tant que la flexibilité de l'investissement en réponse aux signaux de profitabilité est suffisamment faible. Au delà d'une certaine valeur de la flexibilité, on observe une bifurcation de Hopf et le modèle reproduit des cycles dont l'amplitude croît avec la flexibilité. Ces cycles possèdent des caractéristiques proches des observations. On distingue ainsi quatre phases (reprise, expansion avec inflation, contraction avec déflation, dépression avec chômage). Malgré la trop forte amplitude des cycles en termes de prix, on note des caractéristiques réalistes: (i) l'asymétrie du cycle, avec une expansion plus longue que la contraction; (ii) des déphasages corrects entre les variables; (iii) la corrélation positive entre l'inflation et la production; (iv) la période du cycle comprise entre 5 et 6 ans.

Dans ce cadre, le coût d'un événement extrême devient fortement dépendant de la phase du cycle à laquelle l'événement a lieu, comme le montre la Fig.3 : ce coût est quasiment nul s'il a lieu au minimum du cycle, grâce à l'effet de relance, alors que les pertes sont fortement amplifiées s'il a lieu en période de forte croissance, où il y a déjà pénurie de ressources.

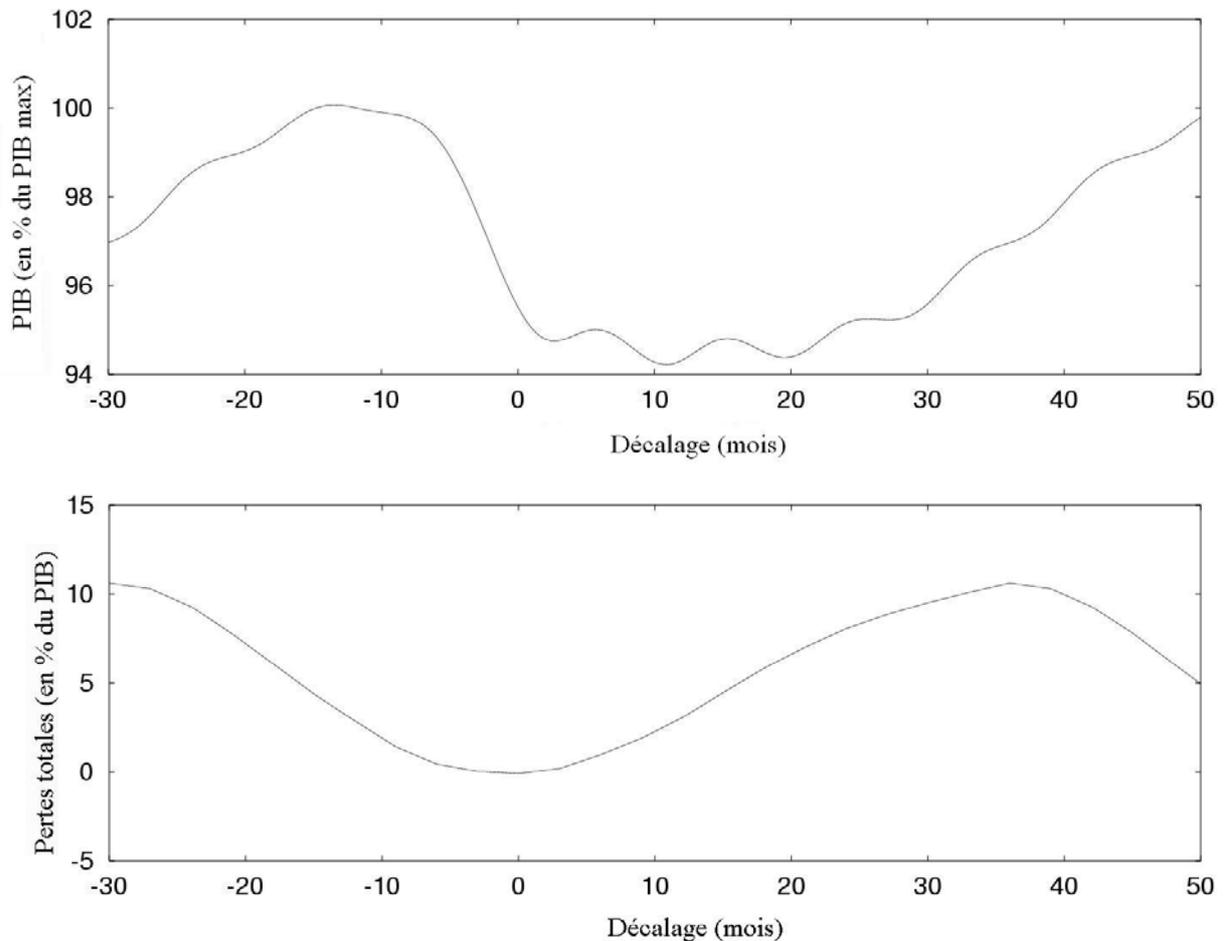


Figure 3 : Le cycle en terme de production, en fonction du décalage par rapport au minimum du cycle (en haut) ; et la perte de PIB totale (intégrée sur 20 ans) dont est responsable une catastrophe, en % du PIB maximal, en fonction du moment où elle a lieu, repéré par rapport au minimum du cycle (en bas). Pour un décalage nul, la catastrophe a lieu au minimum du cycle et son coût est minimum ; pour un décalage d'environ 40 mois, la catastrophe a lieu pendant la phase de forte croissance, et son coût est maximum.

Logiquement, les pertes liées aux événements extrêmes sont donc très dépendantes de la dynamique de l'économie que l'on considère : une économie flexible qui présente des fluctuations endogènes de l'activité est beaucoup plus vulnérable aux chocs exogènes qu'une économie plus rigide et stable. En effet, même si la flexibilité permet de minimiser le coût d'un choc touchant une économie à l'équilibre, elle provoque également des fluctuations qui écartent en permanence l'économie de son équilibre, ce qui lui fait traverser des phases de déséquilibre où elle est très vulnérable.

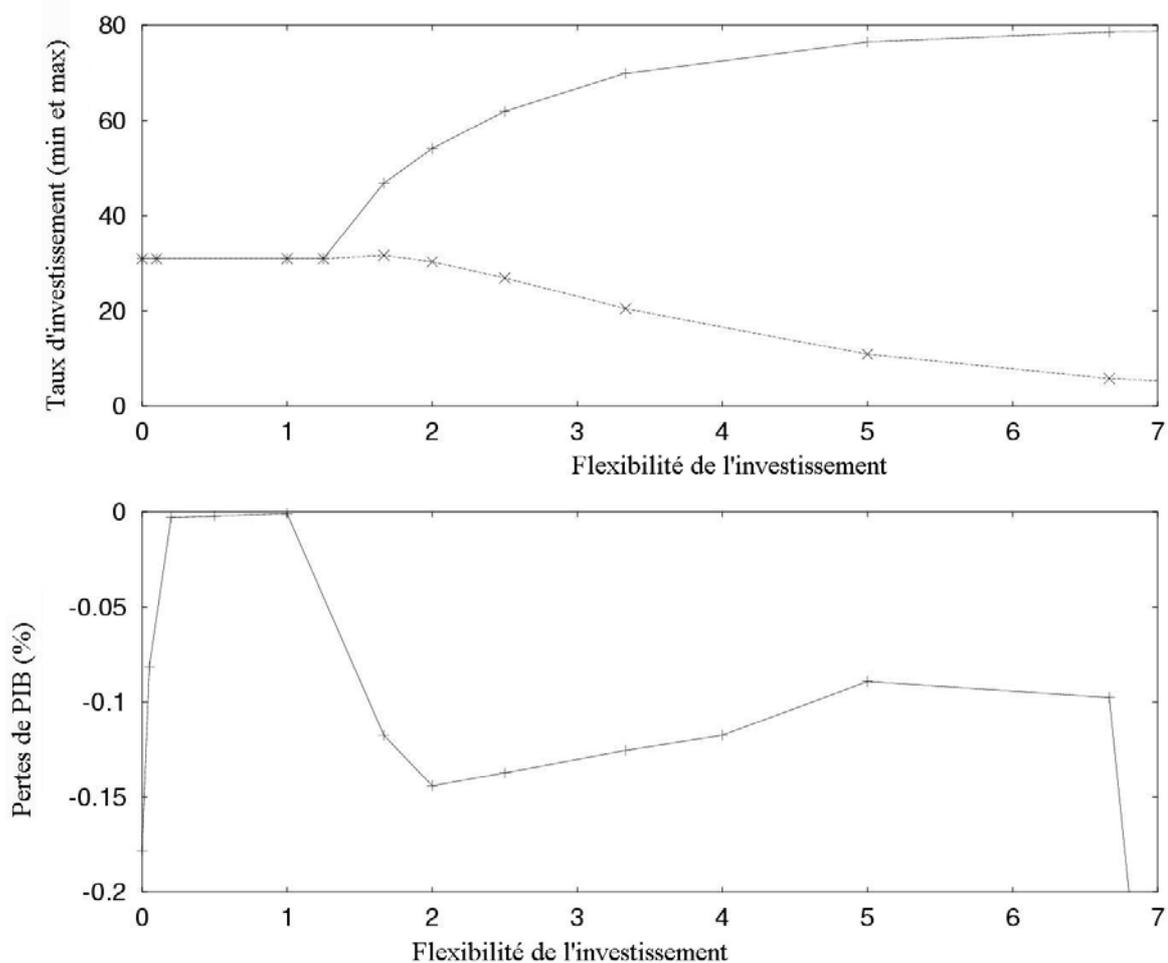


Figure 4 : Au haut, le maximum et le minimum de l'oscillation du taux d'investissement au cours du cycle économique, en fonction de la flexibilité de l'investissement. On remarque la bifurcation aux environs d'une flexibilité de 1.4 : si la flexibilité est inférieure à cette valeur, il n'y a pas de cycle économique ; si elle est supérieure, une cyclicité apparaît, avec une amplitude croissante avec la flexibilité. En bas, le coût d'une distribution réaliste d'événements extrêmes, en fonction de la flexibilité. Le coût décroît avec la flexibilité tant qu'il n'y a pas de cycle, et augmente brutalement avec l'apparition des cycles.

Il semble donc que l'économie la plus robuste à de tels chocs serait une économie très flexible, que des politiques de stabilisation maintiendraient en permanence au voisinage de son équilibre. Ces résultats montrent qu'il n'est pas possible de séparer l'évaluation des dommages de la question de la dynamique propre de l'économie, car ces deux problèmes sont intrinsèquement liés.

Ces différents exercices de modélisation ont permis d'aboutir à deux conclusions.

D'abord, nous insistons sur l'importance des processus de court terme dans l'évaluation des dommages du changement climatique : le problème du changement climatique diffère fondamentalement de l'étude classique de la croissance, dans laquelle les paramètres évoluent lentement et de façon continue et pour laquelle les modèles de croissance *à la Solow* ont été

développés. Au contraire, une grande partie des dommages du changement climatique risque de transiter par des effets de choc. En pratique, même en supposant que les déséquilibres économiques ne sont que transitoires et que l'économie est stable, cela ne veut pas dire que les dommages ne passeront pas par ces processus hors-équilibre transitoires. On a montré de plus que ces transitoires peuvent durer sur de longues périodes (il est question d'infrastructures, d'énergie, de bâtiments), et que leurs effets sur le bien-être peuvent être importants.

Ensuite, nous affirmons l'impossibilité de séparer l'évaluation des dommages et la représentation de la croissance et de la dynamique économique. Cela rend nécessaire un scénario de référence qui tienne compte des stratégies d'adaptation suivies par les agents, des éventuelles contraintes sur les capacités financières et techniques, et de la dynamique propre du système économique et social. Les dommages du changement climatique ne peuvent être seulement représentés comme une perte appliquée à une économie dont la dynamique reste inchangée. Au contraire, les pertes de bien-être pourraient bien provenir d'interactions complexes entre la dynamique économique et des déséquilibres transitoires issus des chocs climatiques. Aussi, cette thèse s'est abstenue de proposer un chiffrage du niveau des dommages.

Nous concluons en insistant sur l'importante distinction entre une incertitude scientifique, inhérente à notre compréhension insuffisante du changement climatique, des impacts et de l'économie, et une incertitude beaucoup plus fondamentale, qui concerne l'avenir *que nous allons construire* et l'état du monde sur lequel le changement climatique s'exercera.

---

Cette thèse a mis en lumière certaines lacunes des évaluations disponibles, qui rendent leurs résultats insuffisamment fiables pour être utilisés dans la décision politique. En particulier, l'importance des interactions d'échelles et la non-séparabilité entre la dynamique économique et les chocs provenant des impacts du changement climatique, suggèrent un ambitieux programme de recherche dont la réalisation devrait permettre de mieux juger de la capacité de nos économies à faire face aux nombreux défis que le changement du climat nous imposera de relever.