



Working Paper

Les modèles IAMs et leurs limites

Alain Grandjean*

Novembre 2024

* Cofondateur et associé de Carbone 4, expert associé à la Chaire Energie et Prospérité, président de l'association The Other Economy

Cette note a bénéficié des commentaires et suggestions de Stéphane Amant, Jean-Paul Bouttes, Gaël Callonnec, Patrick Criqui, Louis Daumas, Louis Delannoy, Antoine Godin, Christophe Goupil, Pierre Jacques, Patrick Jolivet, Matthieu Meaux, Victor Mongay, Alma Monserand, Jean-Pierre Ponsard, Adam Poupard, Quentin Perrier, Thierry Philipponnat, Jean-Pierre Ponsard, Jacques Portalier, Simon Yaspo. Je les en remercie chaleureusement, tout en assumant l'intégralité de son contenu et des erreurs ou manques résiduels.

La Chaire Energie et Prospérité

La chaire Energie et Prospérité a été créée en 2015 pour éclairer les décisions des acteurs publics et privés dans le pilotage de la transition énergétique. Les travaux de recherche conduits s'attachent aux impacts de la transition énergétique sur les économies (croissance, emploi, dette), sur les secteurs d'activité (transport, construction, production d'énergie, finance), aux modes de financement associés ainsi qu'aux problématiques d'accès à l'énergie. Hébergée par la Fondation du Risque, la chaire bénéficie du soutien de l'ADEME, de l'Agence Française de Développement, de la Caisse des Dépôts, d'Engie et de la SNCF.

Les opinions exprimées dans ce papier sont celles de son (ses) auteur(s) et ne reflètent pas nécessairement celles de la Chaire Energie et Prospérité. Ce document est publié sous l'entière responsabilité de son (ses) auteur(s).

Les Working paper de la Chaire Energie et Prospérité sont téléchargeables ici :

<http://www.chair-energy-prosperity.org/category/publications/>

Chair Energy and Prosperity

The Energy and Prosperity Chair was created in 2015 to inform decisions of public and private actors in managing the energy transition. The Chair research deals with the impacts of energy transition on national economies (growth, employment, debt...), on specific sectors (transportation, construction, energy, finance), on access to energy and with the associated financing issues. Hosted by the Risk Foundation, the chair has the support of ADEME, the French Development Agency, the Caisse des Dépôts, Engie and SNCF.

The opinions expressed in this paper are those of the author(s) and do not necessarily reflect the position of Chair Energy and Prosperity. It is therefore published under the sole responsibility of its author(s).

Chair energy and Prosperity working paper can be downloaded here:

<http://www.chair-energy-prosperity.org/en/category/publications-2/>

Les modèles IAMs et leurs limites

Alain Grandjean – Novembre 2024

Cette note a pour but de présenter de manière synthétique les modèles mathématiques utilisés aujourd'hui par la communauté des économistes du climat et leurs limites. Ces modèles sont utilisés à la fois pour dimensionner les mesures à prendre pour limiter le changement climatique et pour évaluer les impacts du changement climatique sur le système économique et financier. Ils sont l'une des sources académiques majeures des rapports du GIEC² pour les groupes III et, dans une moindre mesure II.

Ils visent aussi à éclairer les décideurs publics (gouvernements, banques centrales, Commission européenne, FMI, Banque mondiale, etc.) mais aussi les dirigeants des grandes entreprises privées qui ne peuvent plus ignorer les effets présents et futurs du climat sur l'économie dans son ensemble, donc sur leur propre activité.

Ces modèles sont utilisés pour tenter de représenter l'économie et son évolution aussi fidèlement que possible. Nous verrons en détail leurs difficultés à le faire et proposeront en conclusion des approches pour améliorer la situation.

Notons enfin que ces modèles sont utilisés par le Conseil de stabilité financière et le NGFS dans leurs évaluations des risques financiers liés au climat dont le dernier rapport a été publié en 2022³. Ces analyses servent à déterminer si le système financier est résilient face à ces risques⁴. Les décideurs ont besoin d'être éclairés sur les risques climatiques de long terme et les risques de transition de plus court terme⁵. Dans les deux cas des quantifications sont nécessaires, qui peuvent être fournies par des modèles.

Après quelques rappels sur ce qu'est un modèle et les liens entre scénarios et modèles, la note donne un aperçu des IAMs, puis de quelques modèles⁶ de référence fournis par l'analyse économique sur lesquels se fondent les IAMs et propose des éléments d'analyse critique des principaux IAMs.

² Rappelons que Le GIEC est organisé en trois groupes de travail qui étudient : les principes physiques et écologiques du changement climatique (groupe I) ; les impacts, la vulnérabilité et l'adaptation au changement climatique (groupe II) ; les moyens d'atténuer (mitigation) le changement climatique (groupe III).

³ Voir notamment cette note <https://www.ngfs.net/en/communique-de-presse/current-climate-scenario-analysis-exercises-may-understate-climate-exposures-and-vulnerabilities> et la présentation [Des scénarios climatiques pour banques centrales et superviseurs, l'approche du NGFS](#), réalisée par le secrétariat du NGFS dans un webinaire organisé par The Transition Institute, le 12/09/24.

⁴ Contrairement à ce que suggère l'expression « stress-test climatique » ces exercices ne conduisent pas à proposer des renforcements de fonds propres éventuels.

⁵ La Commission européenne a lancé un travail d'évaluation des risques liés au changement climatique pour le système financier dans son ensemble sur la période allant jusqu'à 2030. Ce travail devrait être achevé en 2025. Voir https://www.esma.europa.eu/sites/default/files/library/Mandate_for_the_FF55_one-off_exercise.pdf

⁶ Cette note n'a pas vocation à être exhaustive. Pour une approche « do it yourself » on peut signaler la plateforme <https://macrosimulation.org/> qui permet aux utilisateurs de simuler numériquement des modèles macroéconomiques clés, présentés avec leurs équations.

NB La grande majorité de ces modèles sont complexes et difficiles d'accès ; ils peuvent contenir pour les plus gros des dizaines de milliers d'équations. Il est vraiment nécessaire d'améliorer leur transparence, et en particulier l'ensemble des hypothèses, des choix et de l'architecture de modélisation et de paramétrage. Sans cet accès il est extrêmement difficile de savoir comment « fonctionne » vraiment le modèle en allant au-delà des présentations qu'en font leurs auteurs. Pour autant, les critiques selon lesquelles ces modèles seraient des boîtes noires qui les rendraient impossibles d'accès (voire les délégitimeraient dans un travail de prospective) ou à l'inverse qu'il faudrait être spécialiste pour les comprendre et les utiliser ne nous semblent pas totalement pertinentes. Les modèles climatiques sont très complexes et pour autant nous en tenons compte⁷. A l'inverse, les experts doivent accepter des présentations synthétiques qui en facilitent l'accès, au prix de simplifications qui ne changent pas fondamentalement les conclusions qu'on peut tirer de ces synthèses. L'économie n'étant pas une science exacte, les modèles économiques reposent sur des présupposés et des raisonnements de fond qu'il est possible ou souhaitable d'explicitier.

Cette analyse critique vise à donner des pistes de réflexion et de recherche sur les lignes directrices du travail à mener pour améliorer notre compréhension des liens entre l'économie et la nature et la rendre opérationnelle, dans une approche prospective.

⁷ D'importants efforts de pédagogie restent cependant à faire pour limiter les risques non nuls de remise en cause de leurs résultats, précisément du fait de cette complexité et de l'opacité qui en résulte auprès de la majorité des citoyens.

SOMMAIRE

1. Qu'est-ce qu'un modèle mathématique ?	6
2. Modèles et scénarios	7
3. Les modèles d'évaluation intégrée (IAMs) : présentation succincte	8
3.1 <i>Les IAMs coûts-bénéfices</i>	9
3.2 <i>Les « detailed process-based IAM »</i>	11
4. Les modèles macroéconomiques précurseurs et leurs limites	14
4.2 <i>Le modèle de Robert Solow</i>	15
4.2 <i>Le modèle de Ramsey</i>	19
5. Les principaux types d'IAM et leurs limites	20
5.1 <i>Le modèle DICE, ses variantes et ses dérivés.</i>	20
5.3 <i>Les modèles d'équilibre général</i>	22
5.4 <i>Les modèles macro-économétriques</i>	28
5.5 <i>Les modèles sectoriels d'offre, de demande ou d'équilibre partiel.</i>	30
5.6 <i>La cohérence stock-flux et les modèles dits SFC</i>	32
5.7 <i>Synthèse</i>	35
6. Conclusion	37
7. Annexes	41
<i>Annexe 1 Les écoles de pensée référentes en matière de modélisation macroéconomique</i>	41
<i>Annexe 2 Une critique fondamentale de la fonction de production</i>	43
<i>Annexe 3 Les équations du modèle de Solow</i>	44
<i>Annexe 4 - Les fonctions de dommage : de quoi s'agit-il ? Leurs limites.</i>	45

1. Qu'est-ce qu'un modèle mathématique ?

Un modèle est constitué d'un ensemble d'équations mathématiques et d'une méthode de résolution, conçues généralement pour simuler de manière simplifiée le fonctionnement d'un système du monde réel. Un modèle peut permettre de prévoir la valeur d'une ou plusieurs variables d'intérêt (exogènes ou endogènes⁸), en fonction de paramètres⁹ fixés par l'utilisateur et d'une ou plusieurs variables d'entrée.

Par exemple, la météo à venir dans une localisation donnée et à un horizon de temps donné peut être prévue (plus ou moins bien...) par un modèle mathématique, dont les équations reposent majoritairement sur des lois physiques, les paramètres quelques caractéristiques bien choisies de l'atmosphère terrestre et dont les données d'entrée sont les conditions initiales qui caractérisent la météo d'aujourd'hui. Les données de sortie de ce modèle sont la température, l'humidité, la couverture nuageuse etc. à une date ultérieure.

On apprend au lycée dans les cours de physique des modèles très simples comme celui qui permet de calculer le point d'arrivée d'une balle pesant un certain poids lancée d'un certain point de départ avec une certaine vitesse.

En économie, l'enseignement de la « microéconomie » est appuyé sur de nombreux petits modèles.

Des modèles mathématiques sont construits et utilisés dans toutes les disciplines et tous les domaines (finance, économie, sociologie, géographie, industrie, bâtiment, agriculture, etc.).

Par contre, ils ne sont pas tous basés sur le même type de connaissances. Les modèles climatiques sont ainsi fondés majoritairement sur des lois physiques – dont la validité a été établie par de multiples expérimentations –, alors que les modèles économiques sont fondés sur des théories économiques, elles-mêmes influencées par des courants de pensée économiques (voir annexe 1). Nous ne reprendrons pas ici la discussion détaillée relative à la comparaison des modèles climatiques et des modèles économiques¹⁰.

Enfin insistons sur les usages des modèles. Comme indiqué en début de paragraphe, les modèles visent généralement à représenter de manière simplifiée la réalité, à faire des projections et dans certains cas, si possible, à faire des prévisions. Mais on peut imaginer d'autres usages possibles des modèles dont ceux que recommandent Jean-Pierre Ponsard et Yann Chazal¹¹ : selon eux, la modélisation est utilisée pour permettre à un ensemble d'acteurs de se projeter dans des changements de rupture qu'ils auraient ensuite la charge de le mettre en œuvre. On verra en conclusion la manière dont est envisagée le recours aux modèles dans

⁸ Une variable endogène est calculée par le modèle, une variable exogène l'est par ailleurs.

⁹ Un paramètre est une valeur numérique qui n'est pas calculée par le modèle et qui n'est donc pas une variable d'entrée mesurée ou observée. Ce paramètre peut être évalué sur la base d'études théoriques ou sur une base empirique.

¹⁰ Voir la note à laquelle nous nous référerons plusieurs fois dans ce papier. [Comparaison des modèles météorologiques, climatiques et économiques : quelles capacités, quelles limites, quels usages ?](#) Alain Grandjean, Gaël Giraud. Mai 2017. Chaire énergie et prospérité.

¹¹ Échanges personnels en 2023.

l'initiative « If »¹² qui vise à aider les dirigeants d'entreprise à imaginer des futurs en rupture, mais sur un terrain de jeu quantitativement défini.

2. Modèles et scénarios

Dans le domaine des projections énergétiques ou climatiques, il ne faut pas confondre modèles et scénarios ; en synthèse, dans le cadre d'un exercice de prospective, un scénario est une représentation simplifiée qualitative, et éventuellement quantitative, de l'avenir sur un horizon de temps défini. Une analyse par scénarios vise à explorer un champ plus ou moins large d'évolutions futures ce qui permet de prendre en considération les incertitudes concernant le sujet étudié, qui sont la source des plus grandes difficultés dans l'exercice de projection (« on ne sait pas à quel saint se vouer »). Une projection n'est en effet pas une prévision.

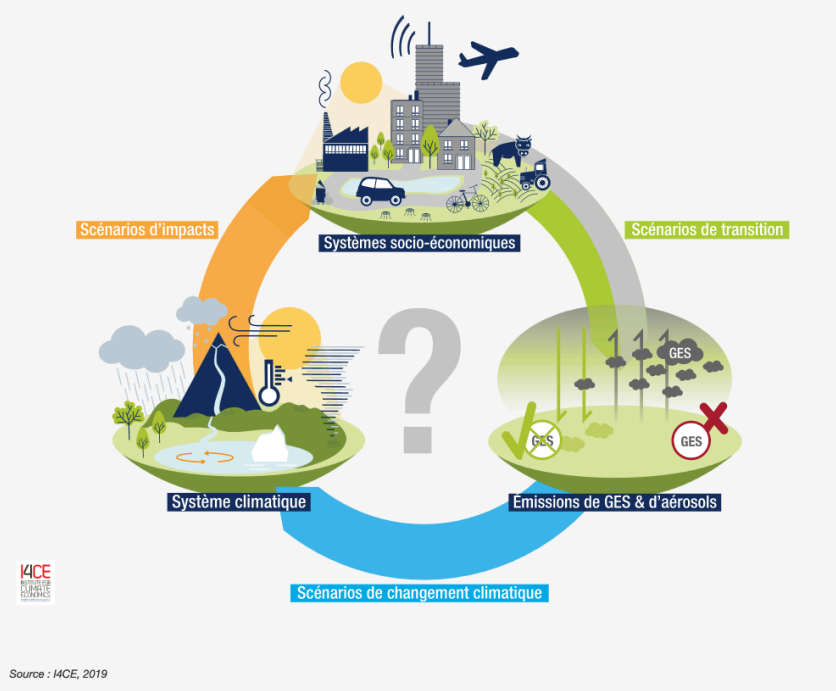
Un scénario peut utiliser un modèle sans que cela soit une nécessité. Inversement de nombreux modèles ne représentent pas une histoire pluriannuelle mais juste une année ; d'autres permettent de faire des simulations quantitatives sans s'appuyer sur des scénarios.

Plus précisément le think tank I4CE a identifié [trois grandes familles de scénarios liés au climat](#).

- Les scénarios climatiques, mobilisés par les climatologues, étudient l'évolution du système climatique en fonction de différentes trajectoires d'émissions de GES (phase 3 de la boucle ci-dessus et groupe I du GIEC, le groupe I ne traitant cependant pas des impacts économiques).
- Les scénarios socio-économiques, mobilisés par les économistes du climat, explorent les conséquences de l'évolution des sociétés humaines sur les trajectoires d'émissions de gaz à effet de serre (et donc in fine sur le réchauffement climatique). Quand il s'agit d'explorer comment limiter les émissions pour atteindre un objectif climatique (2°C ou 1,5°C) on parle de scénario de transition. Ceux-ci sont alors comparés à des scénarios « business as usual » ou dits « de référence » qui consistent à laisser les tendances se poursuivre sans introduire de contrainte nouvelle liée à un objectif climatique. Ces scénarios se situent à la phase 1 et 2 de la boucle ci-dessus et sont principalement étudiés par le groupe III du GIEC.
- Les scénarios d'impact étudient les conséquences du réchauffement sur les sociétés humaines et les systèmes naturels.

¹² Voir <https://www.ifinitiative.com/>

FIGURE 1. LES INTERACTIONS ENTRE LE CLIMAT ET LES SYSTÈMES SOCIO-ÉCONOMIQUES EXPLORÉES PAR LES TROIS FAMILLES DE « SCÉNARIOS LIÉS AU CLIMAT »



Un scénario se compose en général de trois dimensions :

- Un narratif qualitatif (une histoire) décrivant une possible évolution du monde.

Ex : les tendances sociales, économiques et techniques actuelles se poursuivent ; les inégalités augmentent énormément ; l'humanité s'engage résolument dans la transition écologique etc.

- Des hypothèses quantitatives : il s'agit de préciser les variables traduisant le narratif de façon quantitative.

Ex : les hypothèses d'un scénario de transition peuvent porter sur l'évolution (mondiale, régionale, par pays) de la population, du PIB, de l'urbanisation ainsi que des hypothèses sur les moyens (technologiques, politiques, économiques etc.) mis en œuvre pour atteindre les objectifs climatiques identifiés. Les hypothèses d'un scénario climatique seront notamment les trajectoires d'émissions de gaz à effet de serre.

- Un (ou plusieurs) modèles

3. Les modèles d'évaluation intégrée (IAMs) : présentation succincte

Ces modèles ont pour ambition de représenter quantitativement tout ou partie de la boucle climat-développement. En effet l'activité économique en émettant des GES génère le changement climatique qui rétroagit sur l'économie. Ce type de boucle de rétroaction existe aussi pour les ressources naturelles au premier rang desquelles l'énergie mais aussi la biodiversité qui est probablement la ressource la plus sensible. Ils utilisent, pour la plupart, les structures et les briques des modèles macroéconomiques ou sectoriels développés antérieurement et qui ne tenaient aucun compte du climat et pas plus, pour l'immense majorité, des ressources naturelles.

Comme on l'a vu au point précédent, chacune des trois grandes familles de scénarios explore dans le détail une partie de la boucle de rétroaction climat-développement. Pour cela, des modèles très différents sont utilisés.

Les scénarios climatiques se fondent sur les modèles climatiques. Basés principalement sur les lois de la physique, ils visent à faire de façon dynamique des projections de la façon dont le climat peut évoluer au cours du XXI^{ème} siècle en fonction de différents scénarios d'émissions de gaz à effet de serre.

Les scénarios de transition (ou socio-économiques) ont pour ambition d'explorer une grande partie (voire pour certains l'ensemble) de la boucle (même si c'est de façon beaucoup plus superficielle que les scénarios et modèles étudiant une partie spécifique de la boucle).

Pour cela, ils utilisent des modèles d'évaluation intégrée (appelés IAMs, pour « Integrated Assessment Models ») qui ont pour objectif d'aider à comprendre les interactions entre sociétés humaines, développement économique et climat sur le temps long. L'évaluation est dite intégrée car ces modèles utilisent des informations provenant de nombreuses disciplines scientifiques et ambitionnent de décrire à la fois le système humain et des systèmes naturels en couplant des modules représentant l'économie, le système énergétique, le climat etc.

La famille des IAMs¹³ regroupe des modèles très différents en termes de secteurs couverts (plus ou moins précisément), de modes de résolution (logique de simulation ou d'optimisation¹⁴), de paradigmes de modélisation (modèle Bottom up ou Top down / modèle de référence – on verra de quoi il s'agit dans la partie suivante), de précision des technologies, de couverture régionale.

On peut en première approche en distinguer deux grandes catégories.

3.1 Les IAMs coûts-bénéfices¹⁵

Très agrégés (pas ou peu de décomposition géographique et sectorielle), ils ont pour objectif de déterminer la trajectoire d'émissions de GES (et donc de réchauffement planétaire) optimale au sens économique du terme, c'est-à-dire telle que les coûts marginaux de la lutte contre le réchauffement climatique soient égaux aux bénéfices marginaux (ces bénéfices étant identifiés aux dommages évités dans le futur, évalués, ce qui se discute évidemment, en termes de perte de PIB) et dans une optique intertemporelle (on y reviendra plus loin). Insistons ici sur le fait que la notion de coûts est plus complexe qu'il ne le semble (voir la fiche « [qu'est-ce qu'un coût ?](#) » et l'encadré ci-après), et pose de grosses difficultés méthodologiques, au cœur du raisonnement de tous les IAMs et pas seulement des « coûts-bénéfices ».

¹³ Voir la note très complète de Jean-Charles Hourcade, Peter Tankov, Stéphane Voisin, Frédéric Gherzi, Julien Lefèvre. *Les modèles intégrés économie – climat : quels usages pour quelles décisions ?* cf <https://hal.science/hal-03506990/document>

¹⁴ Les logiques de simulation et d'optimisation sont deux approches différentes pour résoudre des problèmes. La logique de simulation consiste à modéliser un système complexe et à simuler son comportement afin de comprendre comment il fonctionne. Cela permet d'observer les effets de différentes variables et de prendre des décisions éclairées. En revanche, la logique d'optimisation vise à trouver la meilleure solution possible à un problème donné en utilisant des techniques mathématiques et algorithmiques. Elle cherche à maximiser ou minimiser une fonction objectif tout en respectant des contraintes spécifiques.

¹⁵ Dits aussi coûts-avantages, expression au fond préférable car un bénéfice est un avantage moins un coût.

De quels coûts¹⁶ parle-t-on ?

Contrairement à l'intuition commune, la notion de coût en matière de lutte contre le changement climatique n'est pas évidente. Citons l'étude de Alexandre C. Köberle et al.¹⁷

« Quatre types de concepts de coûts existent dans la littérature sur l'atténuation du changement climatique : les coûts techniques, sectoriels, macroéconomiques et de bien-être. Ces types de coûts ne sont ni comparables ni équivalents. Les coûts techniques ou d'ingénierie représentent la différence de coût entre les technologies existantes et les nouvelles technologies ; les coûts sectoriels représentent le coût de la transition pour un secteur entier, par exemple le secteur des transports, sans tenir compte des effets plus larges dans le reste de l'économie ; les coûts macroéconomiques sont généralement mesurés comme une réduction du PIB et les coûts de bien-être peuvent tenir compte de facteurs tels que la distribution des revenus, la dégradation de l'environnement ou les résultats en matière de santé. Différents modèles peuvent fournir des estimations de différents types de coûts, en fonction de leur structure. Paltsev et Capros identifient les concepts de coûts souvent utilisés dans les études de modélisation comme la variation du PIB, la variation de la consommation, la variation du bien-être, le coût du système énergétique et la surface sous la courbe du coût marginal de réduction. Dans l'AR5, le choix délibéré de la mesure de la perte de consommation pour présenter les estimations des coûts d'atténuation a permis d'assurer la comparabilité entre les résultats des modèles. Toutefois, la diversité des concepts de coûts dans la littérature sur les IAMs peut conduire à une comparaison involontaire de quantités non équivalentes. »

Cette diversité de concepts et de méthodes de calcul peut conduire, comme l'écrivent ces auteurs, à des appréciations opposées des « coûts » de la transition :

« Par exemple, les estimations numériques des coûts de l'atténuation du changement climatique présentées dans le cinquième rapport d'évaluation du GIEC (AR5) ont suscité des réactions allant de "leurs factures sont devenues énormes"¹⁸ à "le salut devient bon marché"¹⁹.

Ces modèles nécessitent donc d'évaluer et de comparer les dommages futurs du réchauffement climatique et les « coûts d'abattement » (c'est-à-dire de réduction des émissions de GES). En cela, ils explorent réellement toute la boucle économie-climat-économie (même s'ils le font parfois de façon très voire trop synthétique).

Ils sont en particulier utilisés pour déterminer le coût social du carbone c'est-à-dire **le coût actualisé**, en euros d'aujourd'hui, des dommages futurs provoqués par l'émission actuelle d'une tonne de carbone. Ces travaux sont donc en grande partie destinés à éclairer les politiques publiques relatives à la tarification du carbone (via une taxe ou un marché de quotas, voir encadré).

¹⁶ Voir la fiche de la plate-forme The Other Economy sur [la question des coûts](#), plus complexe qu'elle ne le paraît.

¹⁷ Köberle, A.C., Vandyck, T., Guivarch, C. et al. *The cost of mitigation revisited*. *Nat. Clim. Chang.* **11**, 1035–1045 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01203-6>

¹⁸ Another week, another report. *The Economist* (19 April 2014).

¹⁹ Krugman, P. Salvation gets cheap. *New York Times* (17 April 2014).

Exemples : les modèles DICE, RICE, PAGE, FUND sont des IAMs coûts-bénéfices²⁰.

Ces IAMs se fondent sur des modèles macroéconomiques « standard » qu'ils complètent par une boucle de rétroaction climat. On verra plus loin l'exemple du plus connu d'entre eux, [DICE](#), qui a été mis au point par William Nordhaus qui a reçu le « prix Nobel » d'économie pour ses travaux sur la croissance économique et ses liens avec le changement climatique.

3.2 Les « detailed process-based IAM »

Beaucoup plus complexes et désagrégés, ils vont plus loin que les précédents dans l'analyse du couplage des systèmes humains et naturels en faisant interagir des modules qui représentent l'économie (avec plus ou moins de secteurs), le système énergétique, le climat mais aussi parfois l'agriculture et l'utilisation des terres, ou l'eau. Ce sont surtout ces modèles qui sont utilisés dans les scénarios de transition évalués par le groupe III du GIEC. En ce sens ils correspondent à une analyse coût-efficacité. Leur objectif est donc de répondre à des questions du type : comment limiter le réchauffement à +2°C, +1,5°C ? Quel serait l'impact de telle ou telle mesure ? Concernant la politique publique ils s'intéressent tous à l'effet de chroniques de prix du carbone sur les émissions de GES et en déduisent celle qui permet d'atteindre la cible visée²¹.

Prix fictifs du carbone et taxe carbone

Les modèles coût-efficacité s'intéressent à la faisabilité économique de contenir les émissions de GES sous un plafond qui permette de ne pas dépasser une cible de température donnée.

Ce peut être par exemple, et c'est le cas de la France à horizon 2050, une cible de neutralité carbone (les émissions brutes sont égales aux absorptions par les puits « naturels » ou géologiques).

Les émissions de GES étant générées par les activités humaines, elles ne sont réduites que si elles ont un coût pour leur émetteur ou si, plus directement, elles sont limitées voire interdites par des règlements. Il est évidemment très difficile pour un modèle économique de représenter dans le détail les divers dispositifs possibles. La méthode la plus généralement employée consiste à introduire dans le modèle un « prix fictif » du carbone qui se rajoute aux prix des biens et services représentés dans le modèle, et l'augmente (en fonction des émissions de GES induites par ces biens et services). Ce prix fictif est ensuite déterminé pour que les émissions de GES ne dépassent pas le plafond cible.

Ce prix fictif a été estimé pour la France par la [commission Quinet \(2019\)](#) qui a utilisé pour ce faire plusieurs modèles (qui donnaient des résultats différents) et l'a appelé valeur de l'action climatique²². Selon les résultats des travaux de cette commission, cette valeur doit

²⁰ Dice est mondial ; RICE est une version régionalisée de DICE, PAGE et FUND sont régionalisés.

²¹ C'est en utilisant des modèles de cette famille que la commission Quinet a établi ses recommandations pour la France, en matière de « valeur de l'action climatique » ou dit autrement de « valeur tutélaire du carbone ». Voir <https://www.strategie.gouv.fr/publications/de-laction-climat>

²² Ce terme a été employé en substitution du terme « valeur tutélaire du carbone » utilisé dans le [premier rapport Quinet \(2008\)](#). Une troisième mission confiée à Alain Quinet a été lancée en 2024.

être croissante dans le temps (s'élevant à 250 euros par tonne de CO₂ en 2030 et croissant jusqu'à 775€ en 2050).

Il ne faut pas confondre ce prix fictif et la taxe carbone²³ (ou le prix du carbone qui résulte du marché européen des quotas de CO₂). La tarification du carbone par une taxe ou le prix d'un quota n'est qu'une composante d'un dispositif complexe de normes, réglementations, incitations, informations dont l'ensemble vise à réduire les émissions de GES. On peut dire que si l'économie se réduisait à un ensemble de marchés efficients de biens et services, et que le seul outil de politique publique en matière climatique était la « tarification carbone » (via une taxe ou un marché de quotas) alors le prix fictif devrait (sous réserve de la fiabilité des modèles l'établissant) servir de référence à l'établissement de ladite tarification. Notons que certaines institutions, comme l'[OCDE](#) ou le [CGDD](#) appellent « prix effectif du carbone » ou tarification effective, le total de toutes les accises (i.e. taxes assises) sur l'énergie, y compris les marchés de quotas.

Ce prix fictif ne doit pas non plus être confondu avec le coût social du carbone tel qu'il ressort des modèles coûts-bénéfices évoqués ci-dessus qui vise à affecter (via un calcul d'actualisation) à une tonne émise aujourd'hui le coût (actualisé donc) des dommages climatiques qu'elle engendre, dans un scénario de température donné. L'analyse coûts-bénéfices ne vise pas à déterminer une valeur du carbone permettant de limiter sous un plafond des émissions de GES mais à comparer ce coût social du carbone au coût des mesures à mettre en place pour atteindre la température du scénario de température. En théorie, à l'optimum économique, le coût social du carbone est égal au prix fictif du carbone (traduisent le coût des mesures à mettre en place) permettant d'atteindre une hausse de température « optimale ». En pratique ces travaux de modélisation, comme on le verra ici, sont entachées de bien trop d'incertitudes et de faiblesses théoriques pour servir de guide au décideur public.

En termes économiques ce sont des modèles « coût-efficacité » ; ils ne cherchent pas à contribuer à répondre à la question de l'arbitrage coûts-bénéfices (de type : quel serait le meilleur arbitrage entre coûts de l'action et coûts de l'inaction ?), mais à la suivante : quelles sont les meilleures solutions (au sens de minimisation des coûts) à mettre en œuvre pour limiter la hausse de la température à un niveau donné ? Ces modèles correspondent à un positionnement plus modeste de l'économiste qui accepte un objectif exogène donné par un politique informé par les sciences du climat, sans calculer lui-même LA bonne solution résultant d'un arbitrage coût des dommages coût d'abattement

Comme il est dit dans la note citée plus haut²⁴: « En fait, l'utilité première des IAMs est de cerner les risques de transition (risques des investissements 'bas carbone', 'stranded assets') plus proches et tangibles que ceux venant des dommages climatiques pour les acteurs économiques, et de détecter, modulo quelques indicateurs, les degrés d'exposition des actifs aux risques physiques. »

²³ En France la « taxe carbone » est en fait une composante de la [TICPE](#) (Taxe intérieure de consommation sur les produits énergétiques) proportionnelle au contenu carbone du produit taxé°.

²⁴ Voir note 13 ci-dessus, op. cité page 10

Ces modèles ne sont pas tous des modèles macroéconomiques (dans lequel le PIB notamment est, au moins partiellement, endogène²⁵); certains d'entre eux sont dits d'équilibre partiel et ne représentent qu'un ou plusieurs secteurs et donc pas l'économie dans son ensemble, le PIB étant alors une donnée exogène. Mais il est bien sûr possible de construire un modèle endogénéisant le PIB et qui est multisectoriel !

En théorie, ces modèles devraient, comme les précédents, inclure une évaluation des dommages économiques du réchauffement climatique sur l'économie mondiale puisque ceux-ci ont nécessairement une influence sur les modalités de la transition, même dans des scénarios 1,5° ou 2°C²⁶. Mais dans leur majorité ils n'intègrent donc peu ou pas de boucles de rétroaction du climat sur l'économie. Ceci est très problématique car cela signifie en creux que l'économie (à travers le PIB exogène) peut évoluer « hors sol », indépendamment de l'état de la biosphère et des ressources minérales et énergétiques. D'autre part ces modèles ne font pas apparaître les bénéfices de l'action climatique (dont ils donnent un coût).

Cette situation évolue depuis que les banques centrales s'intéressent aux risques financiers liés au climat²⁷. L'Integrated Assessment Modeling Consortium²⁸ a créé un [wiki](#) sur lequel se trouve la documentation de la plupart des IAM utilisés dans le cadre des travaux du GIEC et ceux qui sont cités ici.

²⁵ A noter que le PIB peut être dit « endogène » (quand il résulte d'une fonction de production) mais résulter en partie de paramètres exogènes comme la croissance de la productivité (qui contraint essentiellement l'évolution du PIB à un sentier de croissance exogène).

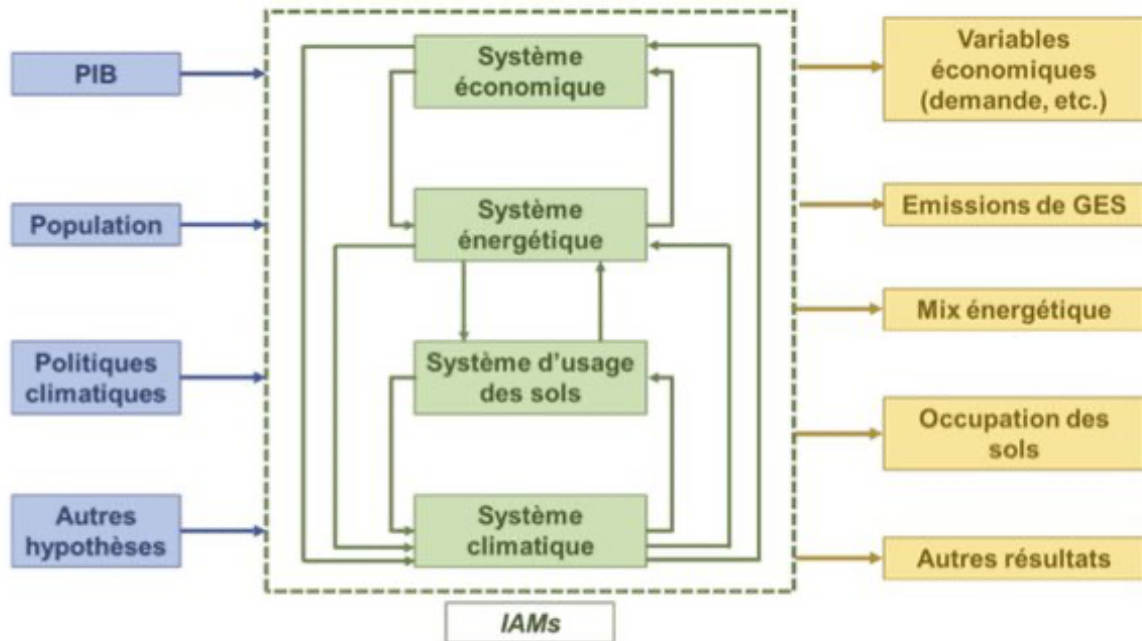
²⁶ Les gigantesques feux de forêt de l'été 2023 en Grèce ou au Canada ont forcément un effet sur leur PIB, tout comme les inondations massives observées en Floride, en Espagne et en Grèce par exemple.

²⁷ Voir <https://theothereconomy.com/fr/fiches/rechauffement-climatique-un-impact-negligeable-sur-la-croissance/#ngfs-risques-climatiques> et

²⁸ L'IAMC est un consortium d'organismes de recherche scientifique créé en 2007 à la suite d'une demande du GIEC. Sa fonction est de coordonner les travaux de la communauté des modélisateurs dans l'élaboration de scénarios de transition.

Représentation simplifiée de la structure d'un Modèle d'évaluation intégrée (IAM) - detailed process based- non macroéconomique

L'image ci-après permet de visualiser comment fonctionnent les IAMs complexes avec les données d'entrée en bleu, les modules en vert représentant différents systèmes humains et naturels et les données de sortie (les résultats) en jaune.



SOURCE [Comprendre les enjeux de la modélisation du lien complexe entre énergie, climat et économie](#) – The Shift Project & IPFEN (2019)

4. Les modèles macroéconomiques précurseurs et leurs limites

Comme nous l'avons vu précédemment, les IAMs (intégrant la dimension macroéconomique) sont en grande partie fondés sur un modèle économique fondé sur une ou des théories économiques elles-mêmes influencées par les paradigmes et courants de pensée dans la discipline (voir annexe 1). Comprendre la composante économique des IAMs suppose de comprendre dans leurs grandes lignes les modèles économiques de référence, leur logique et leurs nombreuses déclinaisons. Cela permet également de se faire une idée des défis posés par l'exercice de modélisation macroéconomique, difficile puisque l'économie résulte de comportements humains largement imprévisibles, du fait de leur complexité individuelle et de leurs interactions. Nous nous limiterons dans la suite aux modèles de référence utilisés en pratique dans les IAMs les plus reconnus.

La démarche qui suit est d'ordre pédagogique et commence par les deux modèles historiquement les plus célèbres.

4.2 Le modèle de Robert Solow

Le modèle de Robert Solow²⁹ vise à expliquer la croissance économique grâce à trois déterminants principaux que sont la démographie, le travail et l'épargne. L'idée en est assez claire : la croissance doit résulter de la synergie entre le travail (fonction de la démographie et du taux d'emploi) et l'accumulation du capital, elle-même provenant de l'épargne. On verra que Solow a du incorporer dans son modèle une représentation « stylisé » (via l'introduction d'une Productivité Globale des Facteurs) du progrès technique pour le rendre cohérente

Ce modèle est une référence toujours reconnue et employée ; ainsi dans les travaux du GIEC [les scénarios SSP](#) (Shared Socio-economic Pathways), construits à partir de modélisations faites par Dellink et al. (2017)) se réfèrent au modèle de Solow. C'est aussi le cas des travaux en cours mettant à jour les SSP pour le prochain rapport du GIEC³⁰.

Concrètement, Solow utilise, comme l'immense majorité des modèles macroéconomiques, une fonction de production³¹ qui relie le PIB (Y) au capital K et au travail L. Il n'y a qu'un seul bien (qui est produit, peut être consommé ou investi pour augmenter la production). Il fait ensuite intervenir un arbitrage simple³² entre épargne (qui va servir à augmenter le capital) et consommation, dont le total est la production. Enfin, il comporte une équation d'évolution de la population active par rapport à la population et une équation de dépréciation du capital.

Les équations du modèle de Solow³³ dans sa version initiale se résolvent facilement (en général les fonctions de production retenues sont des fonctions de Cobb-Douglas qui facilitent les calculs³⁴).

Solow s'est rendu compte que ce modèle ne pouvait en fait pas expliquer la croissance économique (car il converge vers un état stationnaire, dans lequel le PIB par habitant ne progresse plus). Il a suggéré d'introduire de manière tout-à-fait ad hoc un facteur de croissance de la productivité des facteurs de production (le capital et le travail), appelé « résidu de Solow » et plus académiquement PGF ([productivité globale des facteurs](#)), qui reste un vrai mystère dans cette vision de l'économie³⁵; cette croissance de la productivité est

²⁹ Solow, R. M. (1956). *A Contribution to the Theory of Economic Growth*. The Quarterly Journal of Economics, 70(1), 65-94.

³⁰ Voir à ce sujet la note de Loïc Giaccone, <https://climatanthropocene.com/2023/09/18/scenarios-climatiques-croissance-economique-et-decroissance/#8>

³¹ La fonction de production relie la production (qui est en général assimilée au PIB) à des « facteurs de production ». Dans ses débuts les deux facteurs de production retenus étaient le capital et le travail ; aujourd'hui les économistes retiennent aussi parfois en plus comme facteurs de production l'énergie et la matière : $Y = f(K, L, E, M)$. Les trois fonctions utilisées dans la pratique sont les Cobb-Douglas, les CES et les Translog). Voir https://fr.wikipedia.org/wiki/Fonction_de_Cobb-Douglas#.

³² Le modèle de base considère que le taux d'épargne (rapport entre l'épargne et la production) est constant.

³³ Voir annexe 3

³⁴ Voir un exemple ici dans le cours « [La population dans le modèle néo-classique de croissance Cas de la fonction de production est de type COBB-DOUGLAS](#), 2012.

Et un autre ici : <http://mazambatedie.free.fr/spip.php?article29>

³⁵ Voir cet extrait de l'article « La productivité globale des facteurs : comment évaluer plus précisément « notre ignorance » ? Georges Daw dans la Revue économique 2019/2 (Vol. 70), pages 229 à 272 : « En dépit de vocabulaires différenciés ou de menues différences quant aux délimitations des contenus (technologique, institutionnel, organisationnel...), ces lectures reflètent en commun l'impossibilité, pour le moment, d'expliquer exhaustivement la croissance économique. Elles partagent donc essentiellement la façon commode de voir le

exogène (elle ne résulte pas d'équations internes au modèle) et surcompense la décroissance tendancielle « endogène » de la productivité du travail et du capital. Dans la présentation standard du modèle de Solow, ce facteur de croissance de la productivité est intégré systématiquement. La « leçon » tirée paradoxalement³⁶ du modèle de Solow c'est que structurellement et sur le long terme une économie suit un « sentier de croissance » dans lequel le PIB / habitant croît à la vitesse de celle de la PGF, aujourd'hui estimée de l'ordre de 1% par an³⁷ (soit un doublement tous les 70 ans environ).

Avant de faire des remarques critiques signalons que ce modèle, comme celui d'Harrod et Domar qui l'a précédé³⁸ a eu le mérite de permettre de formaliser des raisonnements qui, alors, étaient purement intuitifs et qualitatifs. Les remarques critiques qui suivent sont connues des spécialistes et les macro économistes travaillent à les lever progressivement ; on verra comment dans la suite.

1/ Les notions (production, capital, travail, épargne, consommation, investissement...) sont dans ces modèles de nature « physique » ou « matérielle » mais exprimées non pas en unités physiques mais en prix relatifs. La fonction de production au cœur de ce modèle relie la production au capital et au travail. Le travail ce sont des quantités de temps multipliées par la valeur monétaire du temps de travail. Le capital ce sont des machines, des équipements, des immeubles, des brevets, des marques, etc. exprimées en valeur monétaire, bref c'est un actif (et pas un passif, ce qu'est le capital au sens financier ou comptable du terme). De la même manière l'épargne c'est la production non consommée (et non l'épargne financière, ni l'épargne des ménages qui est égale à leur épargne financière plus leur patrimoine immobilier). Dit autrement c'est un modèle sans monnaie, sans crédit (donc sans dette) et sans marchés financiers ; tout se passe en fait dans ce modèle comme s'il représentait un seul agent supposé produire, épargner, consommer, investir. Mais les flux financiers concernés « dans la vraie vie » ne sont pas représentés. Cette simplification pose plusieurs problèmes économiques et financiers sérieux. Dans ce type de modèle³⁹, en effet, les biens consacrés à l'augmentation du capital (égale à l'investissement) sont les biens produits non détruits comptablement à l'année. Cela revient à dire que l'épargne détermine l'investissement. Dès que l'on introduit des comptes financiers, cette conclusion est fautive : le crédit qui finance en partie l'investissement en est un déterminant clef.

D'autre part, la sphère financière peut connaître des crises endogènes⁴⁰ se traduisant par des crises de l'économie réelle (en termes de récessions, de faillites, de chômage, etc.) comme on l'a vu de manière spectaculaire en 1929 et en 2008. Enfin, sur un plan plus technique,

résidu selon Abramovitz [1956] et Griliches [1996] comme « notre ignorance » des véritables déterminants de la croissance. » <https://www.cairn.info/revue-economique-2019-2-page-229.htm>

³⁶ Cette leçon est paradoxale car le modèle de Solow n'explique précisément pas la croissance...

³⁷ Ces estimations sont très fragiles par construction puisque la PGF est un « résidu » issu d'une modélisation dont on sait qu'elle n'explique pas la croissance économique.

³⁸ Le modèle de Solow répondait à la formalisation de Harrod-Domar (initiée dès l'entre-deux-guerres) et visait à démolir leur résultat (fondé sur la complémentarité K/L) en introduisant une fonction de production où les deux facteurs de production peuvent se substituer.

³⁹ Et plus généralement dans les modèles d'équilibre général qu'on évoquera plus loin.

⁴⁰ C'est-à-dire liées au fonctionnement intrinsèque des marchés financiers comme l'a montré l'économiste Hyman Minsky. Voir "*Stabiliser une économie instable*" Les petits matins, 2016.

l'existence même d'une fonction de production se discute du fait d'un paradoxe théorique⁴¹ : que les valeurs monétaires qui se constatent dans la réalité (pour les biens capitaux et pour le travail) nécessitent monnaie, crédit et échange, et la capacité à « agréger » monétairement des capitaux physiques comme des équipements et des usines suppose évidemment des prix qui sont inexplicables car non représentés dans ce type de modèle. Plus précisément le raisonnement est en fait circulaire : la valorisation du capital suppose la connaissance des prix de ses parties constitutives (pour pouvoir en faire l'agrégation ; or ces prix dépendent du taux d'intérêt, lequel est supposé égal au TRI, donc au taux de rendement du... capital.

2/ C'est un modèle sans ressources naturelles, donc sans contrainte amont sur ces ressources, énergie ou autres, et sans impact aval (les pollutions dont les émissions de GES). Cela revient à faire comme si les ressources naturelles étaient infinies, ou entièrement substituables à du capital artificiel, lui-même issu de la transformation d'un seul bien, comme indiqué. Les possibilités de substitution de ressources naturelles par du capital sont pourtant à l'évidence limitée (ce qui a été formalisé dans un principe de « soutenabilité forte⁴² »).

L'énergie étant d'une part essentielle à la croissance du PIB et, d'autre part, source de la majorité des émissions de CO₂, car elle est d'origine fossile à plus de 80%, ce modèle n'informe en rien sur les relations entre énergie-PIB climat. Plus gravement (voir annexe 2) la forme de la fonction de production (dont dérive le théorème du cost-share⁴³) donne à penser que la sensibilité du PIB à l'énergie est faible en étant égal à sa part monétaire.

Au plan strictement économique, il n'y a pas de contraintes d'offre dans ces modèles, donc pas d'explication de l'inflation par le manque d'offre, phénomène manifeste dans la crise actuelle « post-covid ».

3/ Les facteurs de production travail et capital sont partiellement substituables (on peut avoir la même production avec moins de capital et plus de travail) ; au sein du capital il y a également substitution entre les diverses formes possibles de ce capital, ce qui est aussi très discuté⁴⁴. Cette substituabilité renforce le propos précédent sur l'absence d'explication de l'inflation.

4/ C'est un modèle sans État, sans impôts ni charges sociales ni redistribution.

5/ La fonction de production est à rendement d'échelle constant et les facteurs de production ont une productivité marginale décroissante. La constance du rendement d'échelle veut dire qu'une augmentation des facteurs de production entraîne une augmentation proportionnelle du PIB. Par exemple, un doublement du travail et du capital permet de doubler la production

⁴¹ Ce paradoxe a été mis en évidence très tôt et sa discussion est connue sous le vocable de controverse des deux Cambridge (voir <https://oeconomicus.fr/la-fonction-de-production-et-la-theorie-du-capital-chronique-dune-controverse/>), dans laquelle l'économiste Paul Samuelson (défenseur comme Robert Solow de la fonction de production) a fini par reconnaître son erreur (face à Piero Sraffa et Joan Robinson). Pour autant le recours à des fonctions de production reste la pratique standard en macroéconomie.

⁴² Voir par exemple <https://www.afd.fr/fr/actualites/la-soutenabilite-forte-au-service-dun-developpement-vraiment-durable>

⁴³ Voir <https://theothereconomy.com/fr/fiches/peut-il-y-avoir-de-la-croissance-sans-energie/>

⁴⁴ On ne remplace pas une usine de voitures par un champ d'éoliennes pour le dire de manière un peu provocatrice ; mais cette question est vraiment importante dans la dynamique de la transition : les machines et équipements en place sont carbonés (et plus généralement consommateurs de ressources et générateurs de pollution et ne peuvent être instantanément remplacés par les équipements et machines sobres, propres et bas carbone.

La décroissance de la productivité marginale des facteurs de production signifie qu'une augmentation d'un des facteurs de production, l'autre étant constant, génère de moins en moins d'augmentation de la production. D'autres conditions (dites d'Inada⁴⁵) sont imposées pour que le modèle se résolve mathématiquement. Ces hypothèses sont évidemment également très discutables dans leur généralité. Dans de nombreux secteurs (les réseaux, le numérique, la pharmacie etc.) les rendements sont croissants.

6/ Le modèle représente une économie fermée sans commerce international ni bien sûr monnaies différentes et taux de change.

7/ C'est implicitement un modèle d'équilibre au sens néoclassique : la trajectoire converge nécessairement vers un équilibre unique (toujours globalement asymptotiquement stable).

8/ La diversité des agents économiques n'est pas représentée, les inégalités sociales ne le sont donc pas, pas plus que les différences entre les entreprises (qui peuvent conduire à des situations de monopoles ou d'oligopoles qui conduisent à des situations éloignées de l'équilibre général des théoriciens). C'est l'hypothèse connue sous le nom [d'agent représentatif](#). Elle ne permet pas de traiter les questions de redistribution.

9/ Les équations du modèle ne tiennent pas compte des modifications structurelles de l'économie, et imprévisibles qui peuvent survenir à l'avenir⁴⁶, question centrale dans une démarche prospective. Le changement climatique en cours nous projette dans un monde radicalement différent de celui que nous avons connu ; nous verrons plus loin que les modèles qui visent à représenter des faits économiques sont obligatoirement « calibrés » sur des données réelles observées par le passé. Ils ne peuvent qu'échouer à représenter correctement un avenir radicalement nouveau. Notons que cette difficulté avait été pointée par l'économiste Robert Lucas en 1970⁴⁷ sous une forme un peu différente quand il affirmait que les effets d'une politique économique ne peuvent être prédits à l'aide des données d'une période où cette politique n'était pas en place.

La difficulté de ces modèles face à l'incertitude renforce notre première critique : les crises financières sont imprévisibles. Les modèles sont impuissants à les représenter, ce d'autant qu'elles sont en fait imprévisibles, du fait du fonctionnement intrinsèque des marchés financiers. La crise de 2008 avait d'ailleurs fait naître un mouvement de prise de conscience assez général, incarné par la reine d'Angleterre qui s'était étonnée de manière toute simple « "Comment se fait-il que personne n'ait rien vu ?" »⁴⁸

10/ Ce modèle est évidemment bien trop simplifié pour être confronté à des données réelles.

Cette dernière critique, comme les précédentes, n'enlève en rien à l'intérêt de ce modèle qui ne constitue qu'une étape (franchie en 1956) dans la formalisation des théories de la croissance et qui avait bien évidemment vocation à être amélioré dans les avancées ultérieures de ces théories

⁴⁵ Voir https://fr.wikipedia.org/wiki/Mod%C3%A8le_de_Solow

⁴⁶ Dans les faits, indépendamment du changement climatique le système de prix relatifs se déforme et le contenu structurel du PIB peut fortement varier.

⁴⁷ Lucas, Robert (1976), 'Econometric Policy Evaluation: a critique'

⁴⁸ https://www.lepoint.fr/economie/la-reine-d-angleterre-delivre-une-lecon-d-economie-aux-regulateurs-14-12-2012-1581464_28.php

Notons aussi que les critiques 1 à 10 présentées ici sont levées en partie par les modèles ultérieurs ; nous verrons néanmoins qu'il en reste certaines, très lourdes, quand on vise à donner des conseils aux décideurs qui opèrent dans le monde réel.

4.2 Le modèle de Ramsey

Ce modèle mis au point avant celui de Solow repose dans sa version initiale⁴⁹ sur certaines équations identiques à celle de Solow (fonction de production, dépréciation du capital, offre de travail lié à la population) mais il est plus complexe en ce qui concerne l'arbitrage épargne-consommation. Cet arbitrage est fait non via un taux d'épargne constant mais en supposant que le consommateur (unique) fait un arbitrage inter temporel (entre consommer aujourd'hui ou épargner plus pour pouvoir consommer plus demain, via la production supplémentaire permise par cette épargne) formalisée par l'optimisation d'une [fonction d'utilité](#) qui dépend au premier ordre de sa préférence pour le présent exprimé sous forme d'un [taux d'actualisation](#) (dit parfois taux d'escompte).

Les versions ultérieures⁵⁰ du modèle de Ramsey, représentant une économie décentralisée, le complexifient en représentant plusieurs marchés en équilibre (marché des biens, du travail, du capital).

Malgré une apparente sophistication (l'introduction d'une fonction d'arbitrage qui affine un comportement d'épargne représenté de manière simpliste dans le modèle de Solow) toutes les critiques faites ci-dessus au modèle de Solow peuvent être faites à celui de Ramsey.

Mais la manière dont les consommateurs (en l'occurrence représentée par un agent unique, cf. critique n°8 ci-dessus) sont supposés prendre leurs décisions est pour le moins « héroïque » et nous amène à une critique n°11.

11/ Les consommateurs ne font pas de l'optimisation intertemporelle parfaite et en seraient bien incapables.

Les êtres humains ne se comportent pas comme des [« agents rationnels, des « homines oeconomici »](#) et sont bien incapables de faire des choix inter temporels optimaux au sens de cette théorie économique⁵¹. Le futur est incertain par nature, les agents économiques sont très imparfaitement informés⁵² en outre, ils subissent, dans leur majorité, des contraintes de court terme très fortes, que ce soit en termes de choix de consommation à court terme ou d'accès au crédit bancaire.

Et par ailleurs le paramètre introduit, le taux d'actualisation, pose plus de problèmes qu'il n'en résout. Comme indiqué, le résultat du modèle dépend au premier ordre de ce taux, dont la

⁴⁹ Voir par exemple <https://www.yildizoglu.fr/croissance/croissanceweb/node54.html>

⁵⁰ Voir https://fr.wikipedia.org/wiki/Mod%C3%A8le_de_Ramsey

⁵¹ Le livre d'Olivier Hamant « [La troisième voie du vivant](#) » Odile Jacob, 2002 permet de prendre du recul par rapport au culte de la performance et de comprendre que l'optimisation au sens des économistes n'a rien de « naturel ». De nombreuses voies s'élèvent pour valoriser la notion de résilience contre celle d'optimisation.

⁵² On peut également citer les travaux de Herbert Simon sur la rationalité limitée et les comportements visant la satisfaction et non l'optimisation. Voir par exemple l'article de Laurène Tran, Herbert Simon et la rationalité limitée. [Regards croisés sur l'économie 2018/1 \(n° 22\)](#), <https://www.cairn.info/revue-regards-croises-sur-l-economie-2018-1-page-54.htm>

détermination, quand il est question de choix collectif, a fait couler beaucoup d'encre sans conduire au moindre consensus. Nous y reviendrons plus loin, à propos du modèle DICE.

On peut donc formuler une critique n°12 :

12/ Ce modèle introduit un paramètre, le taux d'actualisation, auquel les résultats du modèle sont très sensibles, et dont le choix est discutable et discuté.

5. Les principaux types d'IAM et leurs limites

Les deux modèles que nous venons de présenter et de critiquer sont des précurseurs. La recherche en macroéconomie a permis de produire de nombreux modèles souvent beaucoup plus complexes, visant soit à mieux représenter des phénomènes trop simplifiés (voire ignorés) par ces ceux premiers soit à « coller » avec des données empiriques. Nous allons dans la suite présenter les principaux types de modèles IAMs, sachant que nombre d'entre eux sont hybrides et recourent donc à des couplages (par exemple de modèles sectoriels avec un modèle d'équilibre général).

5.1 Le modèle DICE, ses variantes et ses dérivés.

Commençons par un focus sur DICE⁵³, le premier modèle intégrant macroéconomie et changement climatique.

Le modèle DICE⁵⁴ est un modèle « à la Ramsey » complété par une boucle de rétroaction climatique, ce qui est la grande innovation de Nordhaus. Depuis sa création, William Nordhaus met régulièrement à jour son modèle et les conclusions qu'il en tire. Sa dernière version date de 2023⁵⁵ et elle conduit à des hausses du coût social du carbone par rapport aux versions précédentes. Mais les coûts de dommages sont toujours extrêmement faibles⁵⁶. Il y écrit⁵⁷ : « En tenant compte de tous ces ajustements, les dommages sont estimés à environ 3,12 % du PIB dans le cas d'un réchauffement global de 3 °C par rapport aux températures préindustrielles et à 12,5 % du PIB dans le cas d'un réchauffement de 6 °C.

En quelques mots⁵⁸ :

- le modèle intègre une représentation simplifiée du « cycle du carbone » et un modèle de température moyenne planétaire fonction des émissions de CO₂ et de la concentration en CO₂.

⁵³ Voir <https://medium.com/enquetes-ecosophiques/%C3%A9conomie-du-climat-o%C3%B9-en-est-on-depuis-nordhaus-d61b8ba317d0> et <https://hal.science/hal-03506990/document>

⁵⁴ Le modèle Fund développé par Richard Tol qui a été auteur au GIEC est de même structure que DICE et sujet aux mêmes critiques, tout comme le modèle PAGE qui a été utilisé par Nicholas Stern. En revanche les usages faits de ces modèles ne sont pas du tout similaires.

⁵⁵ Voir https://www.nber.org/system/files/working_papers/w31112/w31112.pdf

⁵⁶ Voir la fiche de The other economy : <https://theothereconomy.com/fr/fiches/rechauffement-climatique-un-impact-negligeable-sur-la-croissance/>

⁵⁷ Barrage, L., Nordhaus, W.D. (2023) « Policies, projections, and the social cost of carbon : results from the DICE-2023 model », NBER Working paper series (p.9)

⁵⁸ Voir la présentation très pédagogique des équations et de leur résolution, faite par Katheline Schubert, qui y <https://www.cairn.info/revue-d-economie-politique-2019-6-page-887.htm>

- le changement climatique crée des dommages (fonction de la température) qui réduisent la production ; le modèle intègre une fonction de dommage.
- la réduction des émissions de CO₂ (qui limite le changement climatique) réduit également la production ; le modèle intègre une fonction d'abattement (convexe, ce qui veut dire que la réduction des émissions de CO₂ est de plus en plus coûteuse en termes de baisse de production).

La résolution du modèle consiste à comparer les coûts actualisés du changement climatique et ceux de l'abattement des émissions de CO₂.

Limites de DICE

Les 12 remarques faites aux modèles de Solow et Ramsey s'appliquent à DICE sauf une partie de la deuxième puisque DICE modélise les effets du changement climatique sur la production. Mais les fonctions de dommage utilisées sont très discutables⁵⁹(voir encadré). Une équipe d'économistes de l'AFD a conduit un exercice de simulation très parlant⁶⁰ pour tester la validité de fonctions de dommages. Ils utilisent deux fonctions différentes, estimées de manière empirique, qui relient la croissance du PIB ou le niveau du PIB à la température au niveau national, et les appliquent à un **refroidissement** mondial de 4 °C en 2100, ce qui correspond à un retour à des conditions glaciaires. Ils montrent que l'impact présumé sur le PIB moyen mondial par habitant va de -1,8 %, si la température a un impact sur le niveau du PIB, à +36 %, si l'impact est plutôt sur la croissance du PIB. Ces résultats montrent à l'évidence la faiblesse des fonctions de dommage du type de celle de Burk et al., qui est symétrique (identique à la hausse et à la baisse). Mais le même exercice donnerait des résultats sans doute très différents pour d'autres fonctions.

Plus généralement, les conclusions qu'on peut tirer de DICE dépendent de manière déterminante de ces fonctions de dommage, de la forme des coûts d'abattement⁶¹, de la productivité générale des facteurs (qui est exogène comme pour Solow et Ramsey) et du taux d'actualisation retenu (critique n°12 ci-dessus). L'intensité de la controverse ayant opposé Nicholas Stern et William Nordhaus sur le taux d'actualisation⁶² suggère qu'il sera difficile de

⁵⁹ A la fois pour la forme qu'elles peuvent prendre mathématiquement, mais plus fondamentalement parce qu'il est extrêmement difficile en fait d'évaluer monétairement ces dommages futurs et de déterminer le lien entre ces dommages et l'activité économique.

⁶⁰ <https://esd.copernicus.org/articles/11/1073/2020/esd-11-1073-2020.html>

⁶¹ Les coûts d'abattement sont ceux qu'il faut mettre en œuvre pour réduire les émissions de GES. Ils ne sont pas faciles à déterminer et sont très variables selon les technologies mises en œuvre. Ils évoluent aussi dans le temps en fonction des progrès technologiques et des autres coûts (matières et énergie). Voir l'étude pilotée par Patrick Criqui pour la France : https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/fs-2023-note_de_synthese-les_couts_abatement_en_france-mai_2023.pdf

⁶² Le rapport STERN de 2006 utilisait un modèle de la famille du modèle DICE (PAGE, *Policy Analysis of the Greenhouse Effect*) mais avec un taux d'actualisation beaucoup plus bas que celui qu'utilisait alors Nordhaus. Voir par exemple Espagne, E., Fabert, B., Pottier, A., Nadaud, F. & Dumas, P. 2012. "Disentangling the Stern/Nordhaus Controversy: Beyond the Discounting Clash". *SSRN Electronic Journal*.

<https://oeconomicus.fr/quand-et-combien-agir-contre-le-rechauffement-climatique-apercu-dune-controverse-academique-2/>

Voir aussi ce papier d'Olivier Godard publié peu de temps après la sortie du rapport Stern :

https://www.researchgate.net/publication/5090358_Climat_et_generations_futures_-_Un_examen_critique_du_debat_academique_suscite_par_le_Rapport_Stern.

trancher la question de manière consensuelle. Une des possibles raisons profondes à ce débat sans fin est qu'il essaie de mathématiser un choix complexe relevant finalement davantage de l'éthique (à savoir l'importance relative accordée à chaque génération).

Une critique précise et mathématiquement étayée de DICE, réalisée par les économistes Steve Keen et Brian P. Hanley et a été publiée en juillet 2023 [dans le site de Carbon Tracker](#), un think tank consacré au changement climatique. Elle vise à alerter les fonds de pension qui sous-estiment massivement les effets du changement climatique en se fondant sur des conclusions tirées du modèle DICE. A noter que cette note attire l'attention sur une critique fondamentale (liée à la critique n°5 ci-dessus) des fonctions de type Cobb-Douglas à rendement d'échelle constant (voir annexe 3)

5.2 Les modèles d'équilibre général

L'équilibre général de l'économie est une notion issue de la théorie néoclassique selon laquelle il existe un système de prix tel que tous les marchés sont à l'équilibre (l'offre égale la demande et il n'y a ni invendus ni rationnement⁶³). Un modèle d'équilibre général tient compte des interactions économiques entre acteurs et secteurs (les revenus des uns sont les dépenses des autres) contrairement aux modèles en équilibre partiel (voir point suivant).

La première représentation mathématique de cet équilibre général (appelé parfois équilibre walrasien⁶⁴) est due à l'économiste français [Léon Walras](#). Elle a été largement améliorée par les travaux de Gérard Debreu⁶⁵, Kenneth Arrow et Lionel Mc Kenzie. Depuis de nombreux modèles ont été réalisés dans la lignée de cette représentation⁶⁶.

Les modèles à équilibre général calculable (ou CGE pour « Computable General Equilibrium » en anglais), sont des modèles macroéconomiques visant à représenter l'économie de la manière détaillée. Ils sont dits d'« équilibre général » puisqu'ils considèrent les différentes interactions existantes entre la demande et l'offre, et leurs prix, sur les différents marchés : la demande définit l'offre puisqu'elle détermine la quantité nécessaire des biens à produire, et l'offre détermine en retour la demande, à travers les revenus générés qui se traduisent en salaires et en retours sur investissements. Et ils sont dits calculables, car à

Voir le rapport Stern lui-même : Stern N. (dir.) (2006), *The Stern Review Report: the Economics of Climate Change*. London, HM Treasury, 30 Octobre, 603 p.

⁶³ Et suppose la capacité intrinsèque des marchés à s'auto-équilibrer (cette hypothèse transparaît dans la méthode de résolution : essentiellement en inversant la matrice représentant les équations de prix pour obtenir le vecteur de prix relatifs d'équilibre, ce qui est le cœur du modèle walrassien).

⁶⁴ Cette notion d'équilibre est une formalisation de la loi de SAY (voir [la fiche de The Other Economy](#)), connue aussi sous le nom de loi des débouchés, selon laquelle l'offre crée sa demande et qu'il ne peut donc y avoir d'invendus (donc de déséquilibres entre l'offre et la demande. Cette « loi » est manifestement fautive mais elle est souvent considérée comme une simplification acceptable de la réalité. Pourquoi pas, s'il ne s'agit que de faire des modèles de pensée. Mais pas s'il s'agit de tenter de représenter la vie économique.

⁶⁵ Voir Gérard Debreu, *Theory of Value. An Axiomatic Analysis of Economic Equilibrium*, Wiley, 1959, traduit en français, Dunod, Paris, 1984. Voir dans Wikipedia une présentation synthétique du modèle de Debreu : https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89quilibre_g%C3%A9n%C3%A9ral

⁶⁶ Mathématiquement le modèle de Debreu est un modèle de convergence vers un point fixe, qui permet de déterminer « l'équilibre » dans une situation économique donnée ; il ne peut être utilisé en tant que tel pour représenter une dynamique intertemporelle.

part les modèles de Ramsey et Solow, il n'existe généralement pas de solution analytique, d'où le recours à du calcul via des solveurs.

Les modèles CGE représentent les différents acteurs de l'économie et tentent de formaliser leur comportement (d'où l'expression « modèles microfondés⁶⁷) :

- Les consommateurs, qui cherchent à optimiser leur fonction d'utilité, qui varie essentiellement avec leur consommation de multiples biens ;
- Les entreprises qui cherchent à maximiser leur profit, c'est-à-dire la différence entre leurs revenus et leurs coûts ;
- Les gouvernements, qui implémentent des politiques publiques.

Ces modèles représentent l'économie en différents secteurs : on parle de désagrégation sectorielle. L'économie de la région considérée par le modèle est en général découpée *a minima* en une dizaine de secteurs. La décomposition est en général plus détaillée. GTAP⁶⁸ (pour Global Trade Analysis Project) est un projet de base de données commune visant à représenter le plus fidèlement possible l'économie à différentes échelles (mondiale, continentale ou nationale). L'économie y est divisée en 65 secteurs.

Intéressons-nous maintenant à l'utilisation spécifique des modèles CGE sur les questions environnementales.

Dans la littérature d'économie de l'environnement, ces modèles sont principalement utilisés pour simuler les impacts économiques (caractérisés par divers indicateurs comme le PIB, l'emploi agrégé, la consommation, le niveau des prix...), sur une région du monde (un pays, un ensemble de pays, une région ou province d'un pays), de la mise en place de politiques climatiques. Ces politiques peuvent concerner l'implémentation d'instruments économiques (taxation du carbone ou système de quotas d'émissions échangeables, voir encadré page 7) ou non (développement massif d'énergies renouvelables, amélioration de l'efficacité énergétique...).

Le secteur énergétique y est souvent représenté de façon désagrégée : chaque secteur de l'économie nécessite de l'énergie pour son fonctionnement, en quantité variable selon son intensité énergétique. L'énergie utilisée provient elle-même de différentes sources : pétrole, charbon, gaz (pour les énergies fossiles), solaire, éolien, hydraulique (pour les renouvelables), ainsi que nucléaire dans certains cas. Ces modèles sont dits « hybrides » pour les distinguer des CGE purement macroéconomiques qui se limitent à une fonction de production globale.

Le calcul d'un nouvel équilibre repose sur le fait que les secteurs de l'économie sont plus ou moins intensifs en énergie et émissifs en carbone et qu'une certaine réallocation entre les facteurs de production et les sources d'énergie est possible en réponse à une perturbation (augmentation du prix du carbone par exemple).

⁶⁷ Un modèle macroéconomique est dit microfondé si les hypothèses de comportement des agents qui le constituent sont cohérentes avec les résultats microéconomiques. Cette exigence théorique poussée par Robert Lucas et les économistes de la « nouvelle économie classique » est cependant très contestable car les « résultats microéconomiques » en question sont dépendants d'une représentation du comportement de l'être humain (en simplifiant l'homo oeconomicus) qui n'est [vraiment pas conforme aux constats empiriques](#).

⁶⁸ <https://www.gtap.agecon.purdue.edu/databases/v10/index.aspx>

Avant de démarrer une simulation, le modèle est calibré⁶⁹ (sur une ou plusieurs années) pour représenter le plus fidèlement possible l'économie de la région étudiée. Il prend pour cela comme données d'entrée des informations sur l'importance relative de chaque secteur dans l'économie, ainsi que sur les interactions entre ces secteurs à l'année de départ de la simulation.

Certains modèles CGE sont dits statiques, d'autres dynamiques :

-Les modèles statiques représentent l'état de l'économie avant et après l'introduction de la politique climatique, indépendamment du temps. Ils offrent donc une description du système économique à l'équilibre avec ou sans politique, ce qui permet de déduire directement les impacts économiques de la mesure implémentée.

-Les modèles dynamiques sont eux utilisés pour étudier la réponse de l'économie dans le temps suivant un choc économique ou une mesure implémentée. Ils intègrent explicitement le temps comme une de leurs variables, suivant l'état du système économique à intervalles de temps réguliers (par exemple chaque année) après l'implémentation de la politique. L'évaluation des impacts macroéconomiques de politiques environnementales par modèle dynamique se fait de la façon suivante : un premier scénario *business-as-usual* est calculé et décrit l'évolution des indicateurs étudiés dans le cas où aucune politique environnementale supplémentaire par rapport à l'année de départ de la simulation n'est implémentée. Un ou plusieurs scénarios alternatifs (donnant par exemple différents prix au carbone) sont ensuite simulés, et une comparaison par rapport au scénario de référence peut être effectuée.

Citons la note Giraud- Grandjean de 2015⁷⁰ :

« Ces modèles s'appuient sur une représentation dite walrasienne de l'économie, donc sur un schéma néoclassique d'ajustement par une parfaite flexibilité des prix. Ils décrivent explicitement les préférences des consommateurs et les possibilités techniques des entreprises. Une fois le mode de formation des anticipations de ces agents décrit, en effet, ces modèles optimisent leur utilité et leur profit, ce qui permet d'en déduire les offres et les demandes. Les agents économiques sont supposés « rationnels », parfaitement informés et optimisent une fonction d'utilité.

Il y a toute une diversité de modèles de ce type (hybrides, top-down, bottom-up) dans laquelle nous n'entrerons pas ici. Globalement, ces modèles fournissent des informations sur la croissance du PIB, emploi, prix, coût, et sur les variations de bien-être économique des consommateurs. »

⁶⁹ Voir l'article Giraud Grandjean cité ci-dessus, page 36, <http://www.chair-energy-prosperity.org/wp-content/uploads/2017/03/publication-2017-comparaison-modeles-grandjean-giraud-1.pdf>

⁷⁰ Le calibrage d'un modèle consiste à choisir les paramètres du modèle de façon que les valeurs calculées par le modèle soient les plus proches possibles des valeurs observées dans l'économie considérée à une date choisie comme référence. Cette opération nécessaire pose de nombreux problèmes. Voir <http://www.chair-energy-prosperity.org/wp-content/uploads/2017/03/publication-2017-comparaison-modeles-grandjean-giraud-1.pdf>

Les modèles IAMs d'équilibre général néokeynésiens

À la différence des modèles néo-classiques, les modèles néo-keynésiens intègrent des rigidités nominales (sur les salaires ou les prix) venant limiter les mécanismes d'ajustement immédiat aux chocs exogènes, et/ou générant une sous-utilisation des capacités de production. Les modèles « néokeynésiens » diffèrent des modèles néoclassiques par l'introduction de rigidités dans le « retour à l'équilibre ». Les prix ne s'y ajustent pas instantanément pour équilibrer l'offre et la demande sur les marchés (selon la métaphore anglaise ce sont des « sticky prices »), ce qui rend compte de l'existence de déséquilibres transitoires (et notamment d'un chômage involontaire sur le marché du travail et plus généralement une sous-utilisation possible des facteurs) de production et la possibilité [d'effets multiplicateurs](#) keynésiens à court ou moyen terme. Le plus souvent, à long terme, toutes les frictions perdent leur impact : les propriétés de long terme de ces modèles néo-keynésiens sont en général les mêmes que celles des modèles CGE sans friction.

Dans certains modèles, comme Three-Me⁷¹ (qui est donc en partie « post-keynésien⁷² »), l'offre de monnaie y dépend de la politique monétaire qui fixe le taux d'intérêt, à la différence du cadre walrasien où celui-ci est déterminé par la confrontation offre-demande de capital. Ainsi, les investissements peuvent y être financés par création monétaire, sans nécessairement entraîner une hausse du taux d'intérêt qui conduirait à évincer totalement la demande en investissements des autres secteurs de l'économie.

Les modèles DSGE

Les modèles d'équilibre général dynamique et stochastique (DSGE)⁷³ font interagir des agents « représentatifs » dont le comportement est représenté selon la théorie des anticipations rationnelles (cf critique n°11 ci-dessus) : ils maximisent sous contrainte (budgétaire pour les ménages, technologique ou de demande pour les entreprises) une fonction objectif (l'utilité pour les ménages, le profit pour les entreprises) et ce de manière intertemporelle. Dans les modèles de base, les ménages sont « Ricardiens ». Mais cette hypothèse peut être levée.

Par ailleurs ⁷⁴« la structure DSGE implique le respect d'un cadre comptable strict⁷⁵. En particulier, tous les agents sont sujets à des contraintes de budget (gouvernement compris), et les prix et quantités sont déterminés à chaque période de sorte à égaliser l'offre et la demande sur tous les marchés simultanément. Dès lors, une partie des paramètres peuvent être estimés à l'aide de méthodes bayésiennes ou calibrés de sorte à ce qu'ils soient cohérents avec des conditions initiales. »

⁷¹ Dans la catégorie des modèles spécifiques aux questions d'énergie et d'environnement, ThreeME, développé par l'ADEME et l'OFCE, est probablement l'un des principaux néo-keynésiens en France. Voir <https://www.threeme.org/documentation>

⁷² Voir l'annexe 1 présentant les différentes écoles de pensée macroéconomique.

⁷³ Cf. l'entrée « Modèles d'équilibre général dynamique stochastique » sur Wikipédia.org. et voir la critique de ces modèles par [Paul Krugman](#).

⁷⁴ Voir note de Tristan Gantois, Pierre-Louis Girard, Claire Le Gall, N° 2022/2 de Septembre 2022, page 14. Voir <https://www.tresor.economie.gouv.fr/Articles/2022/09/20/evaluation-de-l-impact-macro-economique-de-la-transition-ecologique-revue-des-modeles-macro-environnementaux-usages-et-limites>

⁷⁵ Cadre comptable strict ne veut pas dire cadre comptable pertinent. En particulier, la comptabilisation comptable de la création monétaire est de nature spécifique et pas représentée dans un cadre dit « strict ».

La simulation des chocs est réalisée à partir de l'équilibre de long terme, ou état stationnaire. La complexité de ces modèles implique que le nombre de pays/zones géographiques représentés est limité (en général au maximum à trois). Ils incluent des chocs exogènes stochastiques et des mécanismes d'adaptation des agents économiques aux annonces de politiques publiques et, de façon générale, à tous chocs incertains (par exemple, évolution du progrès technique ou changement dans les préférences des ménages). Ce sont des modèles d'équilibre inter temporel, qui résolvent toute la trajectoire en même temps. Techniquement, les simulations dans de tels modèles reviennent à perturber de manière extérieure l'équilibre (via un choc exogène) qui va éloigner le système de l'équilibre, à représenter comment se propage ce choc, puis se résorbe pour retourner in fine à l'équilibre. Comme dit plus haut, le postulat implicite à cette représentation de l'économie c'est qu'elle revient à l'équilibre.

La Commission européenne a développé une version de QUEST, son modèle DSGE néo-keynésien, pour étudier les problématiques environnementales (dénommé E-QUEST). Le modèle a notamment été utilisé pour évaluer le paquet « Fit-for-55 », en complément des modèles EGC néo-classique GEM-E3 et macroéconométrique postkeynésien E3ME

Ces modèles étant d'équilibre général ne lèvent pas les limites évoquées plus loin pour les CGE.

Exemples de CGE et de DSGE macroenvironnementaux.

Voici quelques modèles parmi les plus reconnus :

REMIND⁷⁶ (Postdam Institute), Imaclim (Cired), WITCH du EIEE-Milan⁷⁷.

E-Quest (Commission européenne)⁷⁸

G-Cubed (développé par Warwick McKibbin et Peter Wilcoxon, et vendu par McKibbin Software Group)

ENV-Linkages, utilisé par l'OCDE pour construire l'Environmental Outlook to 2050.

Limites.

Ces modèles répondent à certaines des critiques émises ci-dessus à propos du modèle de Solow. Ils peuvent contenir une représentation de l'État et des échanges extérieurs (critiques n° 4 et 6).

Ils peuvent également intégrer comme facteur de production l'énergie et/ ou les matières premières et semblent répondre en partie⁷⁹ à la critique n°2.

⁷⁶ REMIND, du Potsdam Institut für Klimaforschung (Allemagne), est un modèle d'équilibre général dont les PIB, bien que fortement déterminés par des hypothèses exogènes de gains de productivité, sont calculés de façon endogène par optimisation intertemporelle avec anticipations parfaites.

⁷⁷ Ce modèle est hybride mais son cœur macro est un CGE

⁷⁸ Voir une présentation de E-Quest et de G-Cubed dans la note de travail de la Direction Générale du Trésor, Évaluation de l'impact macroéconomique de la transition écologique : revue des modèles macro-environnementaux, usages et limites, Tristan Gantois, Pierre-Louis Girard, Claire Le Gall, N° 2022/2 de Septembre 2022, voir <https://www.tresor.economie.gouv.fr/Articles/2022/09/20/evaluation-de-l-impact-macro-economique-de-la-transition-ecologique-revue-des-modeles-macro-environnementaux-usages-et-limites>

⁷⁹ Les premiers modèles appliqués étendant la fonction de production de Solow à l'intrant 'énergie' sont ceux de Hudson et Jorgenson (1974) et Berndt et Wood (1975). Voir aussi Jorgenson, W. D., Wilcoxon, P. (1993). *Energy*

Ils sont par ailleurs beaucoup plus complexes que les modèles de Solow et de Ramsey (avec une ambition de représenter l'économie dans son ensemble et sont donc confrontées aux données statistiques effectives (ils répondent donc à la critique n°10, moyennant cependant de multiples opérations de calibrage⁸⁰).

A l'inverse, ils ne lèvent pas une série de critiques.

Ils ne représentent pas les bouclages de flux et de stocks d'énergie et de matière. Le bouclage énergie-PIB-climat n'est pas satisfaisant comme le montre [l'article de Louis Delannoy et al](#)⁸¹. En résumé, selon ces auteurs, d'une part, la plupart des modèles d'évaluation intégrée manquent de précision dans le secteur de l'énergie et partent généralement du principe que les ressources en combustibles fossiles sont accessibles avec seulement des restrictions économiques. D'autre part, ces IAMs ne tiennent pas compte des rétroactions énergétiques et économiques globales et supposent que la diminution de l'énergie nette ou l'augmentation des coûts énergétiques n'a aucune influence sur la croissance économique. Cette limite est en fait fondamentale⁸² ; elle a suscité un courant de recherche visant à « réintégrer » la physique dans la représentation de l'économie. Nous en reparlerons plus loin.

Ils supposent implicitement une substituabilité (partielle) entre capital (artificiel, les machines et équipements, voire les brevets et la connaissance) et la nature (critique n°3) et ne viennent pas buter sur des contraintes d'offre. Cette non représentation du bouclage physique peut masquer les contraintes liées à la limitation des ressources qui peuvent être des limites à la croissance et des sources d'inflation que ces modèles ne représentent pas.

Ils limitent la capacité d'investissement à l'épargne « préalable » et font toujours état d'un effet d'éviction (les investissements de la transition sont faits au détriment d'autres investissements⁸³ (critiques n°1 et 7). L'équilibre général des marchés (critique n°7) y est posé comme un postulat et ils ne sont pas capables de représenter des crises et des désajustements durables et profonds (qui sont des déséquilibres). La dynamique temporelle des modèles d'équilibre général se fait via des chocs externes au modèle central. Les équations du modèle visent en effet à déterminer pour une année donnée, disons l'année n, l'équilibre général sur

the environment, and economic growth. Chapter 27, Handbook of Natural Resource and Energy Economics, vol. 3, p. 1267-1349. Elsevier.

<https://hal.science/hal-03506990/document>.

C'est le cas du modèle développé par l'ADEME et l'OFCE Three-Me, même s'il est d'inspiration keynésienne, qui est utilisé pour faire [l'évaluation macroéconomique de la SNBC](#) et d'un modèle moins connu Vulcain

<https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-26924-modele-vulcain.pdf>

⁸⁰ Voir l'article Giraud Grandjean cité ci-dessus <http://www.chair-energy-prosperity.org/wp-content/uploads/2017/03/publication-2017-comparaison-modeles-grandjean-giraud-1.pdf>

⁸¹ Emerging Consensus on Net Energy Paves the Way for Improved Integrated Assessment Modeling, SSRN (Social Science Research Network), 2023.

⁸² Voir Fankhauser, S. & Stern, N. Climate change, development, poverty and economics. In *The State of Economics, the State of the World* (eds Basu, K. et al.) (MIT Press, 2016). Giraud, G. The trouble with climate economics: Comments on 'Climate Change, Development, Poverty and Economics' by Sam

Fankhauser and Nicholas Stern. In *The State of Economics, the State of the World* (eds Basu, K. et al.) (MIT Press, Cambridge, MA, 2016). Stern, N., Stiglitz, J. & Taylor, C. The economics of immense risk, urgent action and radical change: Towards new approaches to the economics of climate change. *J. Econ. Methodol.* 29, 181–216 (2022).

⁸³ Il est possible de compliquer les CGE en intégrant des décisions d'investissements publics « exogènes ». Mais nous nous intéressons ici aux logiques de base.

les marchés représentés. L'équilibre de l'année n+1 ne peut se déduire mathématiquement de celui de l'année n que par l'introduction d'une variation qui ne provient pas du modèle lui-même (augmentation de population, progrès technique, implémentation d'instrument économique comme une taxe carbone). Cette difficulté spécifique ne se pose pas pour les modèles dynamiques faisant intervenir des équations différentielles comme celles d'accumulation du capital des modèles de Solow ou de Ramsey.

Ils ne lèvent pas la critique d'absence de prise en compte de disruptions liées au changement climatique (critique n°9) à la fois du fait de leur dynamique interne et des nécessités d'estimation et/ ou de calibrage.

Enfin certains d'entre eux supposent une capacité de raisonnement et d'information des consommateurs extrêmement idéalisée⁸⁴ (en se fondant sur la [théorie des anticipations rationnelles](#)), et introduisent comme Ramsey, un taux d'actualisation pour faire des arbitrages intertemporels (critique n°11).

Notons que ces modèles supposent tous, comme le modèle de Solow « augmenté », que la croissance de la PGF (voir plus haut) est exogène. La croissance du PIB est donc égale à cette croissance plus celle de la population, corrigée des effets endogènes des calculs faits par le modèle. Or, comme le disent les économistes de l'ADEME⁸⁵ : « Il est probable que les risques physiques pourraient pénaliser les gains de productivité anticipés et peser davantage sur les trajectoires macroéconomiques, par exemple en affectant à la baisse le stock de capital, en particulier dans les secteurs où il existe des rendements d'échelle croissants. » L'ADEME annonce que « Des travaux futurs pourront approfondir les risques physiques dans des modèles de croissance endogène ; la modélisation de la production, en intégrant des ressources non-renouvelables (ex : matières premières rares⁸⁶) ou du capital naturel (ex : utilisation des sols, dépendance à des services écosystémiques) ; ou les effets plus larges des risques climatiques sur la recomposition de l'économie et les gains de productivité. »

Ces modèles sont très complexes et répondent à la critique n°10 : ils peuvent être confrontés aux données réelles. Cela ne veut néanmoins pas dire qu'ils sont capables de représenter correctement les mécanismes économiques en jeu car les techniques de calibrage permettent de faire coller un modèle à des données sur des périodes assez longues⁸⁷, sans que cela prouve quoi que ce soit au plan des mécanismes.

5.3 Les modèles macro-économétriques

Les modèles macro-économétriques utilisent les données fournies par les comptes nationaux. Ils se sont développés, par étapes depuis les années 1970, se sont perfectionnés et sophistiqués, leur taille atteignant souvent plusieurs centaines, voire plusieurs milliers d'équations. Construits à partir des concepts de la comptabilité nationale, ce sont des modèles agrégés (on s'intéresse à l'agrégat "entreprises" et pas à telle ou telle entreprise).

⁸⁴ Voir <https://theothereconomy.com/fr/fiches/la-rationalite-de-lhomo-economicus-une-hypothese-infondee/>

⁸⁵ Voir l'étude de l' ADEME citée plus haut, note 72: Les risques climatiques et leurs coûts pour la France. Évaluation macroéconomique : modélisation des fonctions de dommages sectorielles et évaluation d'impact.

⁸⁶ Il existe des modèles permettant de calculer les « empreintes matières » comme [Matmat](#) de l'ADEME

⁸⁷ Dans la note Giraud-Grandjean citée ci-dessus nous suggérons que les modèles soient « [back-testés](#) », seule méthode pour « valider » l'adéquation d'un modèle, mais ce sujet excède l'ambition de cet article-ci.

Le plus souvent⁸⁸ ces modèles sont d'inspiration keynésienne. Ils associent trois grands "blocs" d'équations : le bloc « réel » de la production, le bloc prix-salaires et le bloc monétaire et financier décrivant les principales relations comptables et équations de comportement en œuvre dans l'économie. Ils comportent un système d'équations d'équilibre comptable ou de comportement (par exemple, la relation entre consommation et revenu), résultat des arbitrages d'un ensemble d'agents économiques (un agrégat), dont les choix individuels n'ont pas à être directement explicités (ils ne sont pas « microfondés » et ne recourent pas à des [fonctions d'utilité](#)). Les paramètres de ces équations sont estimés sur des comportements historiques à l'aide des méthodes économétriques traditionnelles.

Ces modèles sont aujourd'hui utilisés par les institutions internationales (OCDE, FMI, Commission européenne, Banque centrale européenne, Banque mondiale les gouvernements, leurs institutions de prévisions ou de conjoncture (Observatoire français de conjoncture économique, REXECODE en France, NIESR au Royaume-Uni (avec le modèle NiGEM), NBER aux États-Unis...) pour simuler les effets des politiques budgétaires ou monétaires.

Leur application principale est surtout l'analyse des effets de court terme, et en particulier la représentation des politiques budgétaires et monétaires, mais ils peuvent être utilisés dans une architecture de modélisation (ce qu'a fait l'ACPR, avec NiGEM⁸⁹). Mais, que ces modèles soient néokeynésiens ou néoclassiques, ils sont assimilables⁹⁰ dans leur logique de long terme à des modèles d'équilibre général : les déséquilibres qu'ils représentent sont transitoires et d'autre part ils ne représentent pas les contraintes physiques autres que celles qui résultent du changement climatique (quand ils contiennent une telle boucle climatique ce qui n'est pas toujours le cas).

Exemples

E3ME⁹¹(Cambridge econometrics) qui est un modèle hybride. Il est macroéconométrique mais revient à l'équilibre à long terme. A noter que le paquet « Fit-for-55 » a été évalué à l'aide de ce modèle.

Le modèle Nemesis de la société Seureco a été utilisé pour l'évaluation de l'ajustement carbone aux frontières et par la commission Quinet.

⁸⁸ A noter que la Direction générale du Trésor, par exemple, utilise aussi un modèle VaR (Vector Auto Regressive) qui n'a pas de contenu théorique et qui prolonge statistiquement une tendance linéaire. Cela marche relativement bien à horizon 6 mois/1 an, à cause de l'inertie économique et en l'absence de pandémie, guerre, etc.).

⁸⁹ Le modèle NiGEM a été utilisé par l'Autorité de Contrôle Prudentiel et de la Résolution (ACPR) de la Banque de France, pour réaliser des projections pour l'exercice pilote de 2020 visant à évaluer la vulnérabilité du secteur financier français face au risque climatique. Voir conclusion.

⁹⁰ Sauf les VAR cités plus haut qui sont inutilisables à long terme.

⁹¹ Energy-Environment-Economy Macro-Econometric Model. E3ME combine les caractéristiques d'un modèle sectoriel annuel à court et moyen terme estimé par des méthodes économétriques formelles et certaines des méthodes des modèles d'équilibre général calculable, fournissant une analyse du mouvement des résultats à long terme pour les indicateurs clés en réponse aux changements politiques. Il s'agit essentiellement d'un modèle de simulation global et dynamique qui est estimé par des méthodes économétriques. Il est composé de 3 modules : énergie, environnement et économie. Il couvre 61 pays, 69 activités pour les pays européens (43 pour les autres pays), 43 biens de consommation, 12 types d'énergie pour 23 activités utilisatrices, 33 catégories professionnelles, etc. Le nombre d'équations du modèle s'élève à plus de 50 000. ...

[Oxford Economics](#) » a développé un, [modèle macroéconométrique très détaillé](#), qui intègre une boucle de rétroaction climat.

Citons également ACCL de la Banque de France, MFMOD de la Banque mondiale et FIDELIO du JRC.

Limites

Ces modèles reposent sur des méthodes d'estimation et de calibrage économétriques. Citons cette critique d'experts de la Direction générale du Trésor⁹² :

« La description des méthodes économétriques utilisées est souvent succincte. Les résultats des tests de stationnarité de la relation de long terme, ainsi que les tests usuels de normalité, d'hétéroscédasticité ou d'autocorrélation, sur le résidu de la dynamique de court terme, ne sont presque jamais publiés. Pourtant, ils conditionnent la convergence des modèles vers leur équilibre de long terme. Par ailleurs, la grande majorité des équations semble être estimée individuellement, alors que les équations de certains blocs (par exemple, pour un secteur et un pays donnés, la production et la demande en facteurs de production) devraient être estimées conjointement. »

Ces critiques sont certes d'ordre technique mais importantes car elles sont la base de la faible transparence de ces modèles.

Ces modèles ne sont pas exposés aux critiques 11 et 12, ils lèvent les critiques 4, 6 et 10. Ils peuvent lever partiellement la critique n°2 (boucle climat) mais pas les autres. En particulier, Ils convergent à long terme vers l'équilibre (critique n° 7), ne peuvent pas représenter de ruptures (critique n°9) et leur représentation de la finance et de la monnaie est généralement nulle ou très sommaire (critiques 1 et 2)

5.4 Les modèles sectoriels d'offre, de demande ou d'équilibre partiel.

Un modèle d'offre s'intéresse à un secteur ou plusieurs pour lesquels la demande est donnée ainsi que les différentes technologies d'offre possibles. Le modèle calcule « l'optimum économique » c'est-à-dire l'offre qui minimise le coût.

Un modèle de demande s'intéresse à simuler l'évolution de la demande dans un ou plusieurs secteurs sans s'intéresser à la manière dont l'offre va y répondre.

Un modèle économique d'équilibre partiel cherche à déterminer les prix et les quantités échangées, le niveau de prix permettant l'ajustement offre-demande sur un marché spécifique. Le fonctionnement d'un modèle économique d'équilibre partiel repose sur des fonctions d'offre et de demande. A l'équilibre, calculé par le modèle, l'offre est égale à la demande. Il suppose que les autres marchés n'ont pas d'impacts sur le marché étudié et qu'il n'y a pas substituabilité entre les biens du marché considéré avec les autres marchés.

Des intégrations entre modèle d'équilibre partiel et modèle d'offre ou de demande sont également possibles (comme ce [travail](#) pour les marchés agricoles).

Ces modèles représentent un ou plusieurs secteurs de l'économie mais ont besoin de paramètres exogènes (PIB, population etc.). Ils reposent sur des modèles économiques d'équilibre partiel ou des modèles d'offre.

⁹² Voir note citée ci-dessus (note 74 page 25).

Exemples

Parmi ces modèles celui qui a le plus de portée (sans pour autant être connu en dehors d'un cercle de spécialistes) est celui de l' AIE, [GECM⁹³](#), car il alimente les scénarios de l' AIE (STEPS, APS, NZE) qui sont connus et utilisés plus largement.

Voici quelques autres modèles parmi les plus reconnus :

AIM⁹⁴ : Le modèle Asia-Pacific Integrated Assessment (AIM) est conçu pour analyser les politiques environnementales et énergétiques en Asie-Pacifique.

GCAM : Le modèle Global Change Assessment Model (Pacific Northwest National Laboratory (États-Unis)) est l'un des modèles IAM les plus utilisés. C'est un modèle de simulation avec anticipations imparfaites et en équilibre partiel, i.e. hypothèses exogènes de PIB et sans rétroaction des contraintes carbone sur le PIB. Il analyse les interactions entre l'économie, l'énergie, l'agriculture, le climat et d'autres systèmes mondiaux.

IMAGE (Postdam Institute) : Integrated Model to Assess the Global Environment (IMAGE) étudie les interactions entre l'environnement, l'économie et les politiques. Il est utilisé pour analyser les scénarios de développement durable.

Mag MPIE (Postdam Institute) représente le secteur agriculture et est couplé avec REMIND),

MARKAL/TIMES/TIAM (AIE⁹⁵): modèles de la famille de Markal.

MESSAGE⁹⁶ (IIASA) : Modèle global d'optimisation économique qui intègre l'énergie, l'environnement et le développement socio-économique. Il est utilisé pour analyser les politiques climatiques et énergétiques. MESSAGEix est une version évoluée du modèle MESSAGE, intégrant une analyse plus détaillée des interactions entre l'énergie, l'environnement et l'économie.

MERGE (Electric Power Research Institute (EPRI) : Modèle for Energy, Resource, and GHG Emissions (examine les impacts des politiques climatiques et énergétiques sur l'économie mondiale et les émissions de gaz à effet de serre).

⁹³ Ce modèle représente la demande et l'offre d'énergie mondiale (décomposée en 26 régions) et les projette à l'avenir. Les données d'entrée du modèle comprennent : le stock historique de technologies, leur coût et leur performance, les statistiques de bilans énergétiques, les politiques publiques (dont les réglementations) et les moteurs socio-économiques (dont le PIB). Les résultats du modèle comprennent : le stock, le coût et la performance projetés des technologies ; les flux d'énergie par combustible ; les besoins et les coûts d'investissement ; la demande de matériaux et de minéraux critiques ; les émissions de CO₂ et de méthane.

⁹⁴ AIM est élaboré par le National Institute for Environmental Studies en collaboration avec Kyoto University, Mizuho Information & Research Institute et plusieurs autres instituts de recherche de la région Asie-Pacifique

⁹⁵ MARKAL-TIMES est un corpus méthodologique développé dans le cadre de l'ETSAP (Energy Technology Systems Analysis Program), un consortium international sous l'égide de l'Agence internationale de l'énergie (dont le Centre de Mathématiques Appliquées (CMA) de Mines Paris Tech est le représentant officiel du gouvernement français à l'AIE/ETSAP). Le CMA développe notamment ces modèles à l'échelle nationale (TIMES-France) et (TIAM-FR). L'University College of London (UCL) développe une version mondiale de TIAM pour évaluer les politiques énergétiques et environnementales à l'échelle mondiale et régionale. TIMES = The Integrated MARKAL-EFOM System, TIAM = Times Integrated Assessment Model.

⁹⁶ Message-Globiom (IIASA) est un modèle intégré qui repose sur une combinaison de cinq modules différents : - le modèle énergétique MESSAGE, -le modèle d'utilisation des terres GLOBIOM, le modèle de pollution atmosphérique et de gaz à effet de serre GAINS, -le modèle macroéconomique agrégé MACRO, le modèle climatique simple MAGICC.

POLES (utilisé par la société Enerdata et [le JRC de la Commission européenne](#)),

PRIMES⁹⁷ (NTUA), utilisée par Commission européenne, se concentre sur les questions énergétiques et environnementales pour l'Europe.

WITCH⁹⁸ : examine les interactions entre le changement climatique, les politiques énergétiques et la croissance économique.

Limites

Ces modèles n'étant pas macroéconomiques ne sont pas redevables des critiques faites plus haut au modèle de Solow ; en particulier ils peuvent représenter de manière très fine un secteur donné, et être confrontés aux données empiriques. Ces possibles « confrontations » ne doivent pas pour autant faire croire non plus à une robustesse à toute épreuve des conclusions qu'on peut en tirer, même sur les secteurs considérés et indépendamment de l'omission des boucles de rétroaction climat. Ces résultats dépendent de choix de paramétrage de la part de leurs réalisateurs⁹⁹.

Ces modèles ont besoin de données exogènes qui sont issues directement ou indirectement de modèles macroéconomiques (si l'on prend comme données exogènes des taux de croissance fournis par une institution internationale, on s'appuie de fait sur les modèles de ladite institution). Les résultats qu'ils produisent sont donc très sensibles par construction aux hypothèses exogènes (pour GECM les principales hypothèses sont rappelées ci-dessus). Ils sont donc implicitement soumis aux limites des modèles macroéconomiques.

5.5 La cohérence stock-flux et les modèles dits SFC

Les modèles « à la Solow » représentent la production, la consommation l'épargne, l'investissement mais pas les dettes et les créances des agents économiques ni la monnaie. L'hypothèse sous-jacente est que la monnaie est neutre et que le total des créances étant par définition égal au total des dettes, leur représentation ne vient pas perturber (sauf conjoncturellement) les dynamiques économiques qui sont pilotées par des données « réelles » (consommation, investissement, épargne, capital, etc.).

Ces modèles ne distinguent donc pas correctement les flux et les stocks financiers¹⁰⁰ et ne garantissent pas que les flux sont égaux aux variations de stock pour une variable donnée. Dit autrement ils peuvent ne pas respecter les équations de la comptabilité nationale qui sont souvent des identités « tautologiques » (le revenu des uns est la dépense des autres, les créances des uns sont les dettes des autres...).

⁹⁷ The PRIMES (Price-induced market equilibrium system) model is being developed by E3Modelling, un spin-off du E3MLab au National Technical University of Athens (NTUA)

⁹⁸ WITCH (World Induced Technical Change Hybrid) est maintenu et développé au [RFF-CMCC European Institute on Economics and the Environment \(EIEE\)](#). IL a été originellement co-développé par la [Fondazione Eni Enrico Mattei \(FEEM\)](#) et le [Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici \(CMCC\)](#).

⁹⁹ L'AIE a tendance par exemple à surestimer le potentiel du Captage Stockage de CO₂ et à sous-estimer les coûts de l'efficacité énergétique notamment relatifs à la rénovation des bâtiments.

¹⁰⁰ La monnaie est essentiellement une dette bancaire. La création monétaire ne peut se formaliser dans un modèle qui ne représente pas les flux et les stocks de dettes et de créances entre les agents économiques, banques comprises.

Un modèle est dit « stock-flux cohérent »¹⁰¹, au plan financier, s'il respecte ces identités. Ils ont été mis en avant initialement par la tradition post-keynésienne¹⁰² pour plusieurs raisons. D'abord parce que cette tradition considère, à juste titre, que la non -prise en considération des stocks est une erreur grave. Pour ne prendre qu'un exemple la « loi de Say » est fautive dans sa généralité. D'une part car une production peut être stockée et non vendue (et c'est bien la vente, par déstockage éventuellement qui engendre des revenus, permettant de rémunérer les salaires et les dividendes). Ensuite les modèles SFC post keynésiens se focalisent sur les flux monétaires au sein d'une économie, et notamment sur la dynamique de crédit, qui est endogène¹⁰³ au fonctionnement de l'économie (et non exogène comme le postulent les monétaristes). Enfin ces modèles permettent également d'étudier l'évolution des positions nettes des agents, ce qui peut mettre en relief des dynamiques insoutenables à l'échelle macroéconomique¹⁰⁴. Ceci est clairement impossible pour des modèles d'équilibre général, pour lesquels une crise financière ne peut provenir que d'un choc externe.

Certains modèles « main-stream » actuels sont SFC mais la plupart d'entre eux ne représentent pas d'actifs financiers autres que le capital productif. Certains ont de fait des représentations des dettes et des créances (les travaux de Paul de Grauwe par exemple) et un secteur financier.

Ces modèles reposent sur les principes des modèles SFC exposés ci-dessus.

L'exemple le plus développé est celui de [Gemmes \(AFD\)](#)¹⁰⁵ qui est décliné en plusieurs versions: modèle monde simplifié, déclinaisons beaucoup plus complètes par pays (Vietnam, Colombie, Inde, Maroc, Tunisie). Comme indiqué dans la présentation faite par l'AFD :

« Le modèle GEMMES (General Monetary and Multisectoral Macrodynamics for the Ecological Shift) est un outil macroéconomique dynamique qui permet d'analyser différents scénarios de politique publique. Ces scénarios sont des représentations quantitatives de futurs possibles. Ils visent à comprendre les facteurs déclencheurs des trajectoires de transition et à les représenter de façon explicite. Ce modèle, qui repose sur une approche stock-flux cohérente, est très complet : il étudie les interactions entre les sphères productives et financières, garantissant ainsi la prise en compte de tous les secteurs de l'économie dans les scénarios de transition. Il peut être personnalisé de façon à intégrer des caractéristiques institutionnelles particulières (mandat des banques centrales, rôle des syndicats dans la négociation des salaires, poids du secteur public, etc.). »

¹⁰¹ Voir l'article de synthèse de Gael Giraud, publiée dans Oxford Open Economy: <https://academic.oup.com/ooec/article/doi/10.1093/ooec/odad007/7282277>

¹⁰² Voir par exemple ce texte d'Edwin Le Héron, le chapitre 14 du livre *L'économie post-keynésienne, histoire, théories et politiques* Berr, Monvoisin et Ponsot . 2018. Le Seuil. (pp.257-277). <https://www.researchgate.net/publication/329829177> La modélisation post-keynésienne stock-flux cohérente contemporaine

Voir aussi <https://www.alternatives-economiques.fr/macroeconomie-de-post-croissance/00106869>

¹⁰³ Voir [le module Monnaie de la plate-forme The other economy](#).

¹⁰⁴ Voir Godley (1999)

https://econpapers.repec.org/article/oupCambje/v_3a23_3ay_3a1999_3ai_3a4_3ap_3a393-411.htm

¹⁰⁵ Voir pour plus de détails : <https://www.afd.fr/en/ressources/modelling-small-open-developing-economies-financialized-world-stock-flow-consistent-prototype-growth-model>

Autres modèles SFC :

[EIRIN](#) développé par [Irène Monasterolo](#), Université d' Utrecht

[DEFINE](#) développé par Yannis Dafermos et Maria Nikolaidi, Université de Greenwich

Limites.

Ils peuvent lever les critiques ci-dessus n°4 (en représentant les Etats et les banques) et n°7 (ce ne sont pas des modèles d'équilibre général, mais des modèles d'inspiration « post-keynésienne »). Ils peuvent lever la critique n°3 et représenter des contraintes d'offre fortes.

Par ailleurs, certains d'entre eux¹⁰⁶ s'inspirent des travaux de modélisation « multi-agents¹⁰⁷ » (en anglais *Agent-Based Models*, ABMs), qui visent à combler une autre limite de la modélisation « néoclassique » qui en général fait l'hypothèse dite de [l'agent représentatif](#) (critique n°8) qui simplifie les comportements des consommateurs et des entreprises en les ramenant à celle d'un agent supposé représentatif de l'ensemble des agents économiques. Enfin ces modèles peuvent représenter des échanges extérieurs, avec des pays aux monnaies différentes (critique n°6).

Ils peuvent ensuite être complétés pour intégrer aussi les limites liées aux ressources naturelles¹⁰⁸ et à l'énergie (critique n°2), ce que tente de faire GEMMES.

¹⁰⁶ Voir par exemple <https://core.ac.uk/download/pdf/51440746.pdf>

¹⁰⁷ Voir par exemple <https://www.cairn.info/revue-de-l-ofce-2017-4-page-289.htm>. On peut cependant remarquer que les ABMs cherchent à préserver l'individualisme méthodologique. Les ménages et les entreprises interagissent à la manière des atomes d'un modèle de physique statistique (eg. Ising), avec des règles de comportement simplistes et individuelles., sans aucune action collective. En outre, le passage à l'échelle agrégée n'est toujours pas maîtrisé aujourd'hui : on n'a aucune théorie analogue à la physique statistique, qui permet de déduire la thermodynamique de la physique des atomes en collision.

¹⁰⁸ Voir Hardt L. et O'Neill D. W., 2017, « *Ecological macroeconomic models: assessing current developments* », *Ecological Economics*, vol. 134, p. 198-211.

5.7 Synthèse

On peut résumer les limites des différentes catégories d'IAMs en reprenant les 12 critiques mises en évidence à propos des modèles de Solow et de Ramsey.

	Critiques	Solow	Ramsey	DICE et autres	CGE/Macroéconométriques/hybrides	SFC	Equilibre partiel
Exemples modèles				RICE, FUND, PAGE	REMIND NiGEM, Oxford economics IMAClim, Message Globiom, Three-Me E3ME, MFMOD, ACCL	Gemmes, Eirin, Define	Markal / Times, IMAGE GCAM POLES Mag MPIE
1	Pas de monnaie ni de finance	O	O	O	Possible	N	NA
2	Pas de Nature, ni de bouclage énergie - économie-climat	O	O	Climat, partiellement	Possible économie vers climat Energie - économie mal représentée	Possible économie vers climat, énergie - économie mal représentée	N
3	Substituabilités Capital-Nature, Capital-Capital et Capital-Travail	O	O	O	N	N	NA
4	Pas d'État	O	O	O	N	N	NA

5	Rendements constants et/ou décroissants	O	O	O	O	O	O
6	Economie fermée	O	O	O	Possibilité ouverte	Possibilité ouverte	NA
7	Equilibre général néoclassique	O	O	O	O	N	NA
8	Un agent représentatif	O	O	O	O	Possibilité multi-agents	NA
9	Pas de « rupture »	O	O	O	O	O	O
10	Pas confrontable aux données empiriques	O	O	O	N mais enjeux de calibrage et de qualité de données	N mais enjeux de calibrage et de qualité de données	N mais enjeux de calibrage et de qualité de données
11	Consommateur à anticipations rationnelles	N	O	O	N	N	
12	Taux d'actualisation	NA	O	O	O		O

Lecture : le modèle (ou la famille de modèles) est « éligible » à la critique : O

Le modèle ne l'est pas en répondant au moins partiellement à la critique : N ou possible, si c'est le cas pour certains modèles de la famille.

La critique n'est pas pertinente par rapport au modèle : NA.

6. Conclusion

Les IAMs forment un ensemble complexe et évolutif de modèles qui visent à répondre à des questions majeures de politique publique ; compte-tenu des limites de ces modèles, liées soit à leur structure (équations théoriques internes discutables), soit à la faible qualité des données économiques, soit au domaine représenté (parfois sectoriel), ils sont peu robustes sur les évaluations de long terme relatives à l'impact du changement climatique sur l'économie. Mais ils sont dans leur majorité également peu adaptés pour l'évaluation du risque de transition, de plus court terme ; en effet ce risque fait rétroagir les marchés financiers et l'économie réelle d'une manière qu'il est vraiment difficile de formaliser. Il est certain que les modèles d'inspirations néoclassiques ou néokeynésiens ne sont pas conçus pour y arriver.

Cela étant, l'économie est un système encore plus complexe que le climat, et beaucoup moins facile à modéliser car elle dépend au premier ordre des comportements humains. Ces comportements évoluent au gré des expériences et des changements institutionnels, sociaux et politiques et – maintenant – des alertes environnementales. Une première erreur est dans ces conditions d'ignorer la possibilité de ruptures ou d'érosion des relations entre agrégats économiques¹⁰⁹ et l'émergence de nouvelles. Une deuxième erreur serait de considérer qu'il existe « un » modèle capable de répondre à toutes les questions qui peuvent se poser. La simplification nécessaire va de pair avec une sélection des variables (et des relations possibles entre elles). Cette sélection est en même temps une sélection des questions auxquelles un modèle est susceptible de répondre. Et aucun modélisateur n'est à l'abri de passer à côté d'une variable ou d'une relation cruciale pour répondre à la question posée.

On ne peut donc pas se contenter de considérer que les difficultés de la modélisation sont dues à une faiblesse intrinsèque du travail des économistes ou à leur incapacité actuelle à intégrer les contraintes matérielles et écologiques qu'ils ont longtemps ignorées ou sous-estimés. Toute tentative de représenter l'économie mondiale et son évolution dans sa complexité se heurtera à des difficultés majeures voire insurmontables.

C'est d'ailleurs la conclusion avancée par [Stern, Stiglitz et Taylor \(2021\)](#), qui expliquent que la méthodologie employée par les IAMs s'avère aujourd'hui inadaptée au risque immense que représente le changement climatique et aux changements économiques radicaux nécessaires.

C'est aussi le point de vue de [Robert S. Pindyck](#)¹¹⁰ dans un article critique largement cité¹¹¹ :

« Les analyses de la politique climatique basées sur les modèles d'évaluation intégrée créent une impression de connaissance et de précision qui est illusoire et peut tromper les décideurs politiques en leur faisant croire que les prévisions générées par les modèles ont une sorte de légitimité scientifique. Malgré le fait que les IAM peuvent être trompeurs en tant que guides

¹⁰⁹ Ainsi la courbe dite de Phillips qui relie les taux d'inflation et de chômage est une relation centrale dans l'orientation des politiques macroéconomiques qui a largement perdu en stabilité au cours des dernières décennies et donc en pertinence. Voir par exemple [O. Blanchard & al., Has the Phillips curve become steeper ?, May 2023](#)

¹¹⁰ Robert S. Pindyck, 2017. "[The Use and Misuse of Models for Climate Policy](#)," [Review of Environmental Economics and Policy](#), Association of Environmental and Resource Economists, vol. 11(1), pages 100-114.

¹¹¹ Voir aussi État de la macroéconomie environnementale appliquée. Gissela Landa Rivera, Paul Malliet, Aurélien Saussay, Frédéric Reynès. Dans Revue de l'OFCE 2017/4 (N° 153), pages 151 à 170 <https://www.cairn.info/revue-de-l-ofce-2017-4-page-151.htm>

pour la politique, ils ont été utilisés par le gouvernement américain pour estimer le coût social du carbone (SCC) et évaluer les politiques fiscales et d'abattement des émissions de GES “.

La charge est rude. Disons de manière plus nuancée que les décideurs politiques et institutionnels ne peuvent pas prendre pour argent comptant les résultats de ces modèles, même s'ils bénéficient d'une aura mathématique et scientifique, et doivent porter attention à leurs limites, en général spécifiées dans la littérature académique. Comme le dit un [rapport de Finance Watch](#) paru en octobre 2023, qui analyse les IAMs, « la modélisation économique induit en erreur sur les effets du changement climatique ». Mais il n'est resté pas moins qu'il est difficile pour ces décideurs de se passer de tels guides à la décision.

Pour contourner les limites intrinsèques à chacun de ces modèles, il est possible d'envisager trois stratégies.

La première consiste à les utiliser éventuellement en les combinant, en fonction des questions posées dans le cadre de l'exercice. C'est celle de la « galaxie » du Deep Decarbonization Pathways Project menée par Henri Waisman à l'IDDRI et les Country and Climate Development Report (42 pays à ce jour) de la Banque Mondiale¹¹² avec Stéphane Hallegatte. Il s'agit d'articuler des modèles sectoriels plutôt technico-économiques, pour identifier les trajectoires nationales les plus « efficaces », avec des modèles macroéconomiques pour en analyser les conditions et conséquences. C'est aussi, mais limitée à la France, la démarche de l'ADEME qui articule le modèle Three-Me avec un modèle matières, MATMAT¹¹³. C'est, autre exemple, la démarche de l'ACPR dans son exercice d'évaluation des risques que fait peser le changement climatique sur l'activité économique¹¹⁴.

¹¹² <https://www.worldbank.org/en/news/feature/2022/07/13/what-you-need-to-know-about-country-climate-and-development-reports>

¹¹³ <https://librairie.ademe.fr/dechets-economie-circulaire/3880-construction-de-matrices-de-flux-de-matieres-pour-une-prospective-integree-energie-matieres-economie.html>

¹¹⁴ Voir https://acpr.banque-france.fr/sites/default/files/medias/documents/20210602_as_exercice_pilote.pdf

L'architecture de modélisation faite par l'ACPR / Banque de France¹¹⁵

Cet exercice vise à mesurer les risques climatiques auxquels sont exposés les établissements financiers français (banques et assurances). Il mobilise plusieurs outils de modélisation.

-En amont, deux IAMs à l'origine des scénarios retenus par le NGFS fournissent les trajectoires de PIB et de prix du carbone pour synthétiser le 'choc' des politiques climatiques : GCAM et REMIND. GCAM, du Pacific Northwest National Laboratory (États-Unis), est un modèle de simulation avec anticipations imparfaites et en équilibre partiel, i.e. avec des hypothèses exogènes de PIB et sans rétroaction des contraintes carbone sur le PIB. REMIND, du Potsdam Institut für Klimaforschung (Allemagne), est un modèle d'équilibre général dont les PIB, bien que fortement déterminés par des hypothèses exogènes de gains de productivité, sont calculés de façon endogène par optimisation intertemporelle avec anticipations parfaites.

-En son cœur, le modèle NiGEM projette une douzaine de variables (PIB, taux d'inflation, chômage, etc...) pour plusieurs dizaines d'économies individuelles et régions ; et un modèle multisectoriel statique décrit, désagrégées en 55 secteurs d'activité, les économies de la France, de la somme du reste de l'UE et du Royaume-Uni, des États-Unis et du 'Reste du monde'.

-En aval, un bloc financier regroupe le modèle de notation de la Banque de France (probabilités de défaut à des échelles plus fines que 55 secteurs), un modèle d'estimation des conséquences des prix du carbone sur les valeurs de marché, et un modèle d'écarts de taux d'intérêt.

NB cette architecture est descendante et ne comporte donc pas de boucles de rétroaction, des modèles « du bas » vers ceux « du haut » ce qui en constitue une limite majeure et conduit à la conclusion que le risque de crédit des institutions financières du fait du changement climatique est compris entre 15 et 17 points de base.

C'est aussi la démarche de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) qui a développé le [GECM](#) (« Global Energy and Climate Model»), pouvant se coupler avec plusieurs autres modèles reconnus internationalement ¹¹⁶.

Pour que cette démarche soit formellement rigoureuse, elle doit s'accompagner de tests de sensibilité aux hypothèses faites, aux paramétrages faits et, plus profondément, aux modèles retenus- dont les structures ont des effets majeurs sur les résultats produits- et faire apparaître les fourchettes à l'intérieur desquelles peuvent se situer les données de sortie des modèles. Il serait vraiment souhaitable de pousser les modélisateurs à « backtester » leurs

¹¹⁵ Extrait de la note sur les IAMs Hourcade et al. (cf note 2 ci-dessus)

¹¹⁶ Le GCEM peut se coupler avec : MAGGIC (Model for the Assessment of Greenhouse Gas Induced Climate Change), développé par Climate Resources, GAINS (Greenhouse Gas – Air Pollution Interactions and Synergies) développé, par l'IIASA, avec GLOBIOM (Global Biosphere Management Model) développé par l'IIASA, AIM (The Aviation Integrated Model) développé par l'University College London (UCL), le GIFM (Global Integrated Monetary and Fiscal) du FMI et le OnSSET, (The Open Source Spatial Electrification Tool) développé par le GIS.

Voir <https://iea.blob.core.windows.net/assets/3a51c827-2b4a-4251-87da-7f28d9c9549b/GlobalEnergyandClimateModel2022Documentation.pdf>, page 16.

modèles (subir des tests rétroactifs de validité¹¹⁷) et à privilégier ceux qui résistent à cette épreuve. La confrontation des données de sorties des modèles aux données observables est le premier critère de validité d'un tel type de modèle.

C'est ce qu'a fait l'économiste Florent Mclsaac, avec succès, pour les modèles dynamiques SFC¹¹⁸. Selon ses travaux seuls ces modèles SFC résistent à un back-testing sur plus d'un an. Les modèles VAR résistent bien sur un an. Les autres ne résistent pas au moindre back-testing.

Ces tests se doivent également d'être transparents, ce qui pose une difficulté, évoquée au début de cette note : les modèles macroéconomiques ne sont pas faciles à présenter aux non-économistes et il faut beaucoup de temps à un économiste pour les comprendre et connaître leurs propriétés intrinsèques. La tentation est grande d'utiliser sans le dire un argument d'autorité¹¹⁹ (« le modèle A fait par l'institution B permet de conclure à C, qui est valide du fait de l'autorité de B »).

La deuxième stratégie, de plus long terme, consiste à pousser la recherche et le développement pour que soient produits des modèles plus robustes aux critiques énoncés dans cette note. D'une part des modèles qui prennent en compte explicitement les limites planétaires (énergie, matière et « pollutions » dont GES). C'est la voie explorée¹²⁰ par l'équipe du [Laboratoire Interdisciplinaire des Energies de Demain](#) (LIED) à l'université de Paris_Diderot, qui considère l'économie comme une structure dissipative hors équilibre qui ne peut être maintenue qu'avec un flux d'énergie et de matière. Il en résulte une modélisation très nouvelle de l'économie. C'est aussi la stratégie suivant, avec une approche différente par Tim Jackson et Peter Victor dans leur modèle Lowgrow¹²¹.

Au plan strictement économique et financier, il est indispensable, d'autre part, de développer et d'appliquer, des modèles « stock-flux-cohérents » (Lowgrow, qu'on vient de citer est SFC.. Il faut enfin faire progresser activement la connaissance et la recherche sur l'évaluation présente et future des dommages climatiques.¹²²

¹¹⁷ Les modèles visant à représenter la réalité sont « calibrés » sur une période donnée et sur cette période ils sont conformes à la réalité par construction. Le « back-testing » consiste à les confronter à une autre période (antérieure) pour voir s'ils donnent sur cette période des résultats conformes...

¹¹⁸ Voir <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/meca.12344>

¹¹⁹ On peut affirmer de manière synthétique que la démarche scientifique moderne fait dépendre la confiance en un énoncé non pas de l'autorité d'une personne, d'une institution ou d'un dieu mais du processus et des procédures utilisés pour l'obtenir (expériences reproductibles, contrôle par les pairs, consensus par une communauté de scientifiques du sujet etc.).

¹²⁰ Voir cet article paru dans la revue Nature, Herbert, É., Giraud, G., Louis-Napoléon, A. *et al.* Macroeconomic dynamics in a finite world based on thermodynamic potential. *Sci Rep* **13**, 18020 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-44699-y>

¹²¹ Voir <https://cusp.ac.uk/themes/s2/lowgrow-sfc/>

¹²² Concernant les fonctions de dommage et la compréhension de leurs coûts c'est l'intérêt à très court terme des acteurs de l'assurance et de la réassurance. Le [rapport 2023 du HCC](#) indique que « La fédération professionnelle France Assurance a annoncé début 2023 que le coût total, pour le secteur des assurances, des catastrophes naturelles (liés à des facteurs climatiques et non climatiques) est de l'ordre de 10 Mrd€ pour la France sur l'ensemble de l'année 2022. Les approches économiques du coût des effets du changement climatique, récemment actualisées pour la France, soulignent depuis plus d'une décennie le risque de coût important pour les finances publiques comme privées en cas d'absence d'intégration des dimensions climatiques dans les secteurs climato-sensibles (voir Robinet et Delahais (2023) « Coût de l'inaction face au changement

La troisième stratégie, adoptée dans [l'initiative IRIS lancée par Carbone4](#), visant à intégrer les contraintes « biophysiques » (liées aux limites en termes de ressources naturelles et d'émissions de GES), consiste à représenter d'abord les contraintes physiques en recourant à des matrices entrées-sorties « physiques » et des modèles aussi transparents que possible (ce qui est plus facile que pour les modèles économiques) pour faire apparaître les conflits d'usage et expliciter des modes de résolution possible (qui sont implicites dans les modèles macroéconomiques). Cette démarche plus « séquentielle » peut paraître moins ambitieuse ; néanmoins la complexité du monde économique, de ses relations avec la nature, les incertitudes très fortes auxquels il est confronté, militent plutôt en faveur de démarches plus modestes mais plus explicites, s'appuyant sur l'intelligence des décideurs. Il est sans doute préférable de leur mettre à disposition une boîte à outils plutôt qu'un « modèle qui fait tout » !

7. Annexes

Annexe 1 Les écoles de pensée référentes en matière de modélisation macroéconomique

Nous recopions ici un extrait de la [note Giraud-Grandjean déjà citée](#).

« Les modèles macroéconomiques se réfèrent implicitement ou explicitement à des écoles de pensée. Celles-ci sont nombreuses mais nous nous limiterons ici aux 4 principales en matière de modélisation. Nous suivons ici l'économiste Steve Keen dans cette typologie¹²³. Notre présentation sera bien sûr très simplifiée.

Les Nouveaux classiques

Pour les économistes classiques puis de la nouvelle économie classique (Robert Lucas, Robert Baro, Thomas Sargent, Neil Wallace), l'économie est en équilibre ou y revient « naturellement » après un choc exogène. Leur représentation de l'économie est « walrasienne ». L'offre est égale à la demande (tous les revenus sont soit consommés, soit investis). L'ajustement entre l'offre et la demande se fait par une parfaite flexibilité des prix. Les agents économiques sont supposés « rationnels », parfaitement informés et optimisent une [fonction d'utilité](#). Dans la version la plus élaborée, les agents sont supposés former des anticipations rationnelles. Il n'y a pas de problème de débouchés : on produit au maximum avec tous les facteurs de production disponibles (équilibre de plein emploi). Du coup il y a un effet d'éviction entre la dépense publique et la dépense privée qui rend l'intervention de l'Etat inutile voir néfaste. Cette vision « walrasienne » s'enracine dans la « révolution » dite néo-classique des économistes marginalistes des années 1870 avec laquelle elle partage une même réduction de l'économie au comportement optimisateur d'agents individuels, une même confiance dans l'aptitude de prix parfaitement flexibles à égaliser offre et demande et, ce faisant, à allouer efficacement les ressources et le capital et un même attachement à la description d'un monde économique exclusivement à l'équilibre.

climatique en France : que sait-on ? » France Stratégie [hps://www.strategie.gouv.fr/publications/cout-de-linaction-face-changement-climatique-france-sai](https://www.strategie.gouv.fr/publications/cout-de-linaction-face-changement-climatique-france-sai)..

¹²³ L'imposture économique, op.cit. : Chap X, Pourquoi ils n'ont pas vu venir la crise, p 241-306.

Dans cette vision la monnaie est neutre¹²⁴. L'économie est financée grâce à l'épargne, qui est entièrement mobilisée. La variation des taux d'intérêt assure l'équilibre entre l'épargne et l'investissement. Globalement, les modèles d'équilibre général calculables « walrasiens » sont issus de cette école, même s'il est possible d'utiliser l'architecture des DSGE en étant post-keynésiens !

La "synthèse keynésienne"

Suite à la crise de 1929, qui a montré que l'économie ne revenait pas spontanément à l'équilibre. L'intervention de l'Etat et plus généralement celle de la puissance publique sont alors apparues comme indispensables, et pas seulement pour fixer les règles du jeu de la concurrence. John Maynard Keynes a théorisé une nouvelle vision de l'économie, qui n'était cependant pas complètement aboutie. Une synthèse de la vision keynésienne et de l'économie marginaliste néo-classique fut initiée par John R. Hicks¹²⁵ dès 1937 et développée par P.A. Samuelson après-guerre. Cette synthèse reposait essentiellement sur le modèle macro-économique IS-LM (Investment, Saving, Liquidity, Money).

A partir des années 1960, cependant, Robert Lucas et certains de ses épigones ont considéré que le modèle IS-LM n'était pas réductible à l'étude de comportements individuels (alors que Hicks, en 1981, affirmera le contraire). Dès lors, ils estimèrent le modèle IS-LM discrédité, et entreprirent de refonder l'économie sur des hypothèses entièrement néo-classiques portant sur le comportement optimisateur des individus (cf. Les Nouveaux classiques). Surtout, la grande différence entre la "synthèse keynésienne" et ces Nouveaux Classiques est que l'intervention de l'Etat devient inutile, voire nocive, dans la perspective des Nouveaux Classiques alors qu'elle était considérée, dans la synthèse keynésienne comme pouvant contribuer à alimenter la demande agrégée en période de récession.

Aujourd'hui, il n'existe quasiment plus d'équipe de chercheurs en économie se réclamant de la synthèse keynésienne. La plupart ont opté soit pour l'école néo-keynésienne soit pour les post-keynésiens.

Les néo-keynésiens

On appelle néokeynésiens, les successeurs de Keynes se reconnaissant non seulement dans la "synthèse keynésienne" mais encore tentant de la rendre compatible avec les desiderata formulés par Lucas, entre autres, en termes de fondements micro-économiques des équations macro-économiques. Dans cette synthèse, les prix sont formés par l'égalité offre - demande mais avec des viscosités de prix, contrairement à la vision classique « pure », donc avec des « imperfections » de marché. Dans cette optique, les imperfections des marchés ne permettent pas à ces derniers d'allouer immédiatement de manière efficace les ressources et le capital, ce qui laisse une place à l'intervention publique pour pallier des défaillances de marchés. Mais cette place est limitée à ces seules défaillances et, par définition, temporaire. Olivier Blanchard ou Paul Krugman font partie des économistes contemporains qui adhèrent à ce programme analytique. Pour ces auteurs, la monnaie n'est pas neutre à court terme (à cause de la viscosité des prix) mais elle l'est toujours à long terme. En revanche, la plupart

¹²⁴ Jean-Baptiste SAY, dès 1760, faisait de la neutralité de la monnaie LA condition de la véracité de la loi selon laquelle l'offre crée sa propre demande, connue sous le nom de loi des débouchés qui fut remise en cause par Keynes. Du coup dans les modèles néoclassiques il n'y a pas d'emprunt bancaire ni de création monétaire.

¹²⁵ John Hicks· Mr. Keynes and the 'Classics': A Suggested Interpretation, *Econometrica*, vol. 5, 1937, p. 147-159.

d'entre eux, à de très rares exceptions près, considèrent que la monnaie est émise de manière exogène par la Banque Centrale, alors que nous savons qu'elle est endogène.

Les post-keynésiens

Représentés initialement par des auteurs comme Michal Kalecki, Joan Robinson, Nicholas Kaldor, et Piero Sraffa, essentiellement les acteurs de Cambridge UK dans la querelle sur le capital, les post-keynésiens considèrent que l'ajustement de l'offre et de la demande ne se fait pas par les prix mais par les quantités (avec des règles de rationnement). Dans les modèles d'inspiration post-keynésienne, les prix ne sont pas aussi flexibles que dans les modèles néo-keynésiens.

Par ailleurs, pour les post-keynésiens, la monnaie n'est neutre ni à court, ni à long terme, et la plupart d'entre eux considèrent qu'elle est endogène, point sur lequel Keynes ne s'est jamais prononcé. C'est dans ce courant que s'inscrivent des auteurs comme Josef Steindl, Hyman Minsky ou Steve Keen. «

Annexe 2 Une critique fondamentale de la fonction de production

Extrait traduit de la [note de Carbon Tracker](#) citée ci-dessus (page 18).

« En revanche, lorsque les économistes néoclassiques incluent l'énergie dans leurs fonctions de production (Engström et Gars 2016 ; Bachmann et al. 2022), ils lui accordent un poids très faible. Au lieu qu'une baisse de 10 % de l'énergie entraîne une baisse de 10 % du PIB, ce qui est cohérent avec les données, ils affirment généralement qu'une baisse de 10 % de l'énergie n'entraînerait qu'une baisse de 0,3 à 0,4 % du PIB : "Une baisse de 10 % de l'énergie réduit la production de 0,4 %" (Bachmann et al. 2022, p. 3). (voir fiche <https://theothereconomy.com/fr/fiches/peut-il-y-avoir-de-la-croissance-sans-energie/>).

Cette prédiction (...) manifestement fautive d'un point de vue empirique repose sur la fonction de production Cobb-Douglas (FPCD), qui présente la production comme une fonction de la technologie, multipliée par les intrants élevés à une puissance, la somme de ces puissances étant égale à 1. Cette contrainte sur la somme des exposants est due à l'hypothèse tout à fait raisonnable des "rendements d'échelle constants" : si vous doublez tous les intrants, vous doublez la production. Les problèmes sont liés à la valeur des exposants utilisés pour les différents intrants.

Les économistes basent ces exposants sur la part que le "facteur de production" concerné obtient dans le revenu national. Dans la fonction de production standard avec seulement deux facteurs, le travail (L) et le capital (K), l'exposant du capital est fixé à 0,3, de sorte que l'exposant du travail est de 0,7 :

$$Y(t) = A(t) \cdot L(t)^{0.7} \cdot K(t)^{0.3} \quad (0.10)$$

Lorsque la fonction de production est modifiée pour inclure l'énergie (E), le même traitement lui est accordé. Comme le secteur de l'énergie représente 3-4% du PIB, les économistes utilisent 0,03-0,04 pour la valeur de son exposant :

« Nous choisissons cet exposant dans la fonction de production de manière à ce qu'il corresponde à la part de la consommation de gaz, de pétrole et de charbon dans l'ENB allemand, qui est d'environ 4 %. (Bachmann et al. 2022, p. 15) Ils maintiennent normalement

l'exposant du capital à 0,3 et réduisent l'exposant du travail, de sorte que leur équation modifiée pour la production en fonction de l'énergie ainsi que du travail et du capital est la suivante :

$$Y(t) = A(t) \cdot L(t)^{0.66} \cdot K(t)^{0.3} \cdot E(t)^{0.04} \quad (0.11)$$

L'impact prévu d'une variation de l'énergie sur la production peut être trouvé en différenciant Y par rapport à E. Cela permet de prédire que la variation du PIB sera de 4 % de la variation de l'énergie, de sorte qu'une baisse de 10 % de l'apport énergétique - alors que les apports en travail et en capital restent constants - n'entraînerait qu'une baisse de 0,4 % du PIB. Les données empiriques présentées dans les figures 25 à 27 montrent que cette hypothèse est clairement erronée et qu'une estimation empirique plus précise est une relation linéaire entre la variation de l'énergie et la variation du PIB, avec un minimum de 0,8, soit vingt fois le coefficient utilisé par les économistes néoclassiques. Cette relation linéaire entre la production et l'énergie est très similaire à la relation linéaire trouvée empiriquement entre la production et le stock de capital, connue sous le nom de "fonction de production de Leontief". Les économistes classiques rejettent ce modèle de production au motif qu'il contredit la théorie économique néoclassique. »

Annexe 3 Les équations du modèle de Solow

(extrait d'une [présentation de Jonas Kibala Kuma](#)¹²⁶)

Définition et hypothèses

H1 : La concurrence pure et parfaite : dans ce modèle, les agents sont price takers¹²⁷(1).

H2 : L'économie considérée est fermée, avec un bien unique qui sert à la fois à la production et à la consommation. Ce bien est produit selon la technique de production au sens de Harrod : $Y=F(K,AL)$, c'est l'équation (4). Il est supposé également l'équilibre sur le marché des biens et services : $Y_t=C_t+I_t$ (équation 1). De ce fait, la quantité produite de ce bien correspond à la quantité consommée et investie.

H3 : Le taux d'épargne (s) ne change pas avec le temps, il est exogène : $S_t=sY_t$. C'est la fraction constante du revenu après avoir consommé (Y_t-C_t).

H4 : Le marché des capitaux est supposé en équilibre tel que la coordination des stratégies des agents privés et le plein emploi des facteurs de production sont assurés. Dans une économie fermée, l'investissement est par définition la fraction non consommée de la production/l'épargne : $I_t=sY_t$ (équation 2).

H5 : L'investissement est tel qu'il accroît le stock de capital physique dans le temps : $I_t=\Delta K_t=dK_t$ ou K' . A long terme, le capital se déprécie au taux constant « δ », et l'accroissement net du capital est : $\Delta K_t=dK_t$ ou $K'=K_t-K_{t-1}=I_t-\delta K_t$ (équation 3). Parce que le marché des capitaux est en équilibre, ΔK_t devient : $K'=sY_t-\delta K_t=sF(K,AL)-\delta K_t$

¹²⁶ Voir Kibala Kuma J. (2019), « Dérivation des équations de convergence dans le modèle de Solow : démarche mathématique », Note technique n°001/CER3/12-19 du CER-3/CREQ, décembre.

¹²⁷ Le prix est une donnée (exogène) du marché, les décisions des agents économiques ne jouent pas

H6 : La population employée croît à un taux exogène constant « n » (avec A_0 , le niveau initial de l'emploi) : $L_t = L_0 e^{nt}$ (équation 5)

H7 : La fonction de production est de type « néo-classique » ; de ce fait, elle vérifie des propriétés impliquant l'existence, l'unicité et la stabilité de l'équilibre.

Équations :

$$Y_t = C_t + I_t \quad (1)$$

$$I_t = sY_t \quad (2)$$

$$\Delta K_t = dK_t \text{ ou } K'_t = K_t - K_{t-1} = I_t - \delta K_t \quad (3)$$

$$Y_t = F[K_t, A_t L_t] = K_t^\alpha (A_t L_t)^{1-\alpha} \quad (4)$$

$$\Delta L_t / L_t = (L_t - L_{t-1}) / L_t = d \ln L_t = n \quad (5)$$

Annexe 4 - Les fonctions de dommage¹²⁸ : de quoi s'agit-il ? Leurs limites.

Les fonctions de dommage¹²⁹

Telles qu'elles sont définies à l'origine, les fonctions de dommage sont des fonctions mathématiques reliant les évolutions de la température à une perte de Produit Intérieur Brut (PIB)¹³⁰ agrégées au niveau mondial. Elles sont utilisées dans les modèles d'évaluation intégrée (IAM), soit de manière dynamique en rétroagissant sur l'économie (ex : DICE), soit de manière externe en corrigeant le PIB hors modèle (ex : base de données du NGFS).

La forme fonctionnelle retenue a souvent été une fonction polynomiale quadratique, de telle manière à tenir compte de la non-linéarité des effets du changement climatique. Si la majorité des fonctions étudiées modélisent un effet sur le niveau du PIB, certaines d'entre elles représentent plutôt un effet sur le taux de croissance du PIB (NGFS, 2019). La plupart de ces fonctions sont donc de la forme suivante :

$$Y_{réel} = (1 - f(T)) \times Y_{théorique} \text{ avec } f(T) = aT + bT^2, 0 \leq f(T) \leq 1$$

Plus que leur forme, qui reste une hypothèse à la discrétion des économistes, mais sur laquelle nous reviendrons plus loin, c'est la calibration de ces fonctions qui a fait l'objet des plus grandes controverses. Depuis les travaux originaux de Nordhaus (1992), Howard et Sterner (2017) proposent un historique détaillé des méthodes développées pour les estimer :

- Les approches énumératives, qui agrègent un effet économique sur la production à partir de la littérature scientifique ou à la discrétion de certains auteurs, d'une liste de dommages plus ou moins exhaustive ;

¹²⁸ Voir aussi la fiche de Thee other economy : <https://theothereconomy.com/fr/fiches/rechauffement-climatique-un-impact-negligeable-sur-la-croissance/#definition-fonction-de-dommage>

¹²⁹ Cet encadré s'inspire étroitement d'une étude de l'ADEME publiée en décembre 2023 : *Les risques climatiques et leurs coûts pour la France. Évaluation macroéconomique : modélisation des fonctions de dommages sectorielles et évaluation d'impact*. Elle n'engage en aucun cas l'ADEME

¹³⁰ Certains papiers appliquent aussi la fonction de dommage sur le PIB et sur le capital, Voir par exemple ; "Financial impacts of climate change mitigation policies and their macroeconomic implications: a stock-flow consistent approach" (with E. Bovari & F. Mclsaac) *Climate Policy*, 20(2), 179-198, (2019).

- Les approches économétriques, évaluant un effet causal des variations de température sur le PIB : employées à partir des années 2000 sur des données « en coupe » (c'est-à-dire des données régionales pour une même année), ces approches se sont étendues à partir de 2010 à des données « de panel » (c'est-à-dire des données régionales répétées sur plusieurs périodes) ;
- Les approches en équilibre général calculable (CGE), ou approches « bottom-up », qui visent à introduire à la fois du côté de l'offre et de la demande des chocs sectoriels issus de la littérature scientifique, élargissant ainsi le champ de l'approche énumérative en incluant les effets dynamiques d'un modèle macroéconomique.

Ces fonctions sont alors souvent calibrées par des régressions d'estimations de dommages sur les niveaux d'élévation de température correspondants. Mais les données utilisées intègrent de plus en plus un ensemble de résultats passés pour former des « méta-analyses » qui se superposent et rendent plus difficile la lecture des résultats qui dépendent alors de la prépondérance des chercheurs du domaine.

Trois fonctions de dommages mondiales issues de ces travaux serviront de référence aux travaux du NGFS (2019) : deux issues de méta-analyses, de Nordhaus et Moffat (2017) et Howard et Sterner (2017) ; une issue de Kalkuhl et Wenz (2020) à partir de l'économétrie de panel.

Les limites des fonctions de dommage.

Enfin, de nombreux biais significatifs ont été relevés (Howard & Sterner, 2017), portant à la fois sur la méthodologie d'estimation et sur l'exhaustivité et la comparabilité des résultats. Ces limitations sont synthétisées dans le

Tableau 1 ci-après.

En synthèse, les fonctions de dommage utilisées dans la majorité des travaux sous-estiment largement ces dommages et encore plus les dommages futurs et ce pour plusieurs raisons :

- l'évolution des impacts du climat n'est pas linéaire, les impacts vont s'amplifier
- certains dommages sont liés à des phénomènes extrêmes dont les impacts sont intrinsèquement difficiles à évaluer et encore plus à prévoir
- les risques de « bascule » peuvent changer considérablement la donne¹³¹
- les dommages non marchands échappent aujourd'hui à l'analyse et ils peuvent être très significatifs
- les dommages peuvent être occasionnés par le jeu en cascade de chaînes de valeur qui sont difficiles à appréhender et en tout état de cause pas représentés par les IAMs.

¹³¹ Cf. cet article récent publié dans le JEEM : <https://ehess.hal.science/hal-04250702v1>

Tableau 1 : Comparaison et limitations des méthodologies d'estimation

Type d'approche	Fourchettes des dommages (% de PIB)	Couverture des dommages	Limitations méthodologiques
Énumérative (années 1990)	2,3 à -11,5% (1,0 - 3,0°C)	Omet un grand nombre de dommages marchands, non-marchands et aigus, et les effets d'équilibre général.	À la discrétion des études scientifiques externes et/ou d'opinions subjectives. Pas d'interaction des dommages et de distinction sectorielle et offre/demande.
Économétrie en coupe (années 2000)	de +0,1 à -16,3 % (0,7 - 3,2°C)	Peut omettre les dommages marchands (ceux non intervenus ou ceux concentrés spatialement).	Risque de biais lié à des variables omises.
Économétrie en panel (années 2010)	de 0,3 à -23% (3,4 - 4,3 °C)	Omet les dommages non-marchands et aigus, et les effets d'équilibre général.	Pas d'explicitation précise des mécanismes économiques en jeu.
Modèles d'équilibre général calculable (années 2010)	de -0,2 à -4,6 % (1,5 - 4,8°C)	Omet les dommages non-marchands et aigus.	À la discrétion des études scientifiques externes et/ou d'opinions subjectives.

Source : À partir d'Howard et Sterner (2017).

Fonctions de dommage et risques extrêmes.

Signalons pour finir :

- l'intéressant travail¹³² de Romain Fillon, Nicolas Taconet et Céline Guivarch, qui montre en résumé que si l'on pense qu'il existe des risques climatiques catastrophiques, il faut atténuer davantage nos émissions aujourd'hui pour nous assurer contre ces risques.

-l'approche très différente et plus satisfaisante intellectuellement de Sandy Trust et al.¹³³ dans une étude publiée en 2024 ; la famille de courbe de dommage considérée est de type logistique¹³⁴ en prenant comme hypothèse de base que la baisse de PIB est de 100% dans un scénario de réchauffement de 6°C, 5° ou même moins, où le réchauffement et ses

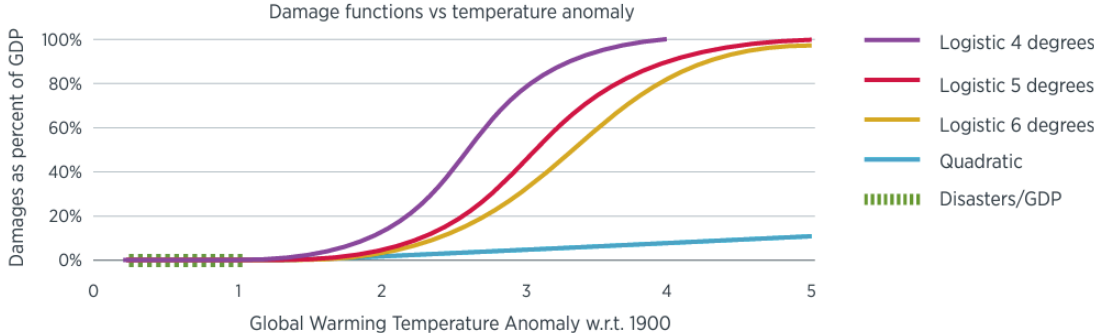
¹³² « Optimal climate policy under tipping risk and temporal risk aversion ». Nouvel article publié dans Journal of Environmental Economics and Management, par Romain Fillon, Nicolas Taconet b

¹³³ Voir The Emperor's New Climate Scenarios, Sandy Trust, Sanjay Joshi, Tim Lenton and Jack Oliver <https://actuaries.org.uk/media/qeydewmk/the-emperor-s-new-climate-scenarios.pdf>

¹³⁴ La courbe présentée dans cet encadré est extraite du rapport ci-dessus mentionné.

conséquences rendent la vie économique impossible. Evidemment ce choix change entièrement les conclusions !

Figure 9: Climate damage functions - % GDP loss vs temperature



Source: Carbon Tracker (forthcoming), Keen et al, IFoA analysis. Reproduced with permission.