



CHAIRE ÉNERGIE & PROSPÉRITÉ

Financement et évaluations de la transition énergétique

Working Paper

Comparaison des modèles météorologiques, climatiques et économiques : quelles capacités, quelles limites, quels usages ?

Alain Grandjean¹, Gaël Giraud².

Mai 2017

Contact : Alain Grandjean, alain.grandjean@wanadoo.fr

¹ Expert associé à la Chaire Energie et Prospérité.

² Agence Française de Développement, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, Centre d'Économie de la Sorbonne, Chaire Énergie et Prospérité, CNRS, Paris, France.

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) et aux modes de financement associés. Hébergée par la Fondation du Risque, la chaire bénéficie du soutien de l'ADEME, d'Air Liquide, de l'Agence Française de Développement, de la Caisse des Dépôts, de Mirova, de Schneider Electric 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/>

Comparaison des modèles météorologiques, climatiques et économiques : quelles capacités, quelles limites quels usages ?

Alain Grandjean, Expert associé à la Chaire Energie et Prospérité

Gaël Giraud, Economiste en chef de l'Agence Française de Développement, Directeur de Recherches au CNRS, Co-directeur de la Chaire Energie et Prospérité.

Résumé

Le diagnostic du changement climatique et de ses conséquences physiques repose sur une représentation modélisée et assez solide des phénomènes en cause. Les effets économiques du changement climatique, de diverses stratégies d'atténuation et d'adaptation, peuvent également être modélisés, en recourant alors à des théories économiques pas toujours explicitées et dont la validité est plus discutable. Tous ces modèles, influents dans la décision publique, ont des capacités et des limites bien différentes, et ce pour plusieurs raisons que la présente note a pour but de mettre en lumière. Elle se conclut par une série de recommandations relatives au bon usage des modèles économiques.

Remerciements

Cette note a bénéficié des commentaires et suggestions de Thomas Brand, François Marie-Bréon, Marion Cohen, Gaël Callonnec, Eloi Laurent, Florent Mc Isaac, Mireille Martini, Valérie Masson-Delmotte, Eloi Laurent, Marie-Laure Nauleau, Adrien Nguyen Huu, Antonin Pottier, Baptiste Perrissin-Fabert, Cédric Philibert, Didier Roche, Marie-Noëlle Woillez. Nous les en remercions chaleureusement tout en assumant l'intégralité de son contenu et des erreurs ou manques résiduels.

SOMMAIRE

Introduction

1	Qu'est-ce qu'un modèle ? Comment se teste t-il ? A quoi sert-il ?	5
1.1	<i>Qu'est-ce qu'un modèle ?</i>	5
1.2	<i>Comment se teste t-il ?</i>	6
1.3	<i>A quoi sert un modèle ?</i>	7
1.3.1	Tester quantitativement une théorie ou une hypothèse	7
1.3.2	Faire des prévisions.	9
1.3.3	Aider à la décision.	12
2	Quelques exemples de modèles dans les trois domaines	13
2.1	<i>Climat</i>	13
2.2	<i>Météo</i>	13
2.3	<i>Economie</i>	14
3	Différences entre modèles climatiques et modèles économiques	20
3.1	<i>L'extension et l'exhaustivité de la représentation</i>	21
3.2	<i>La qualité des données</i>	24
3.3	<i>La pertinence et la représentativité des indicateurs de sortie des modèles</i>	26
3.4	<i>La validité des relations que représentent les équations mathématiques</i>	29
3.5	<i>La pertinence et la robustesse des tests</i>	34
3.6	<i>Le poids du calibrage et de l'estimation des paramètres</i>	36
3.7	<i>La dynamique du modèle</i>	38
4	Les difficultés spécifiques des modèles économiques d'évaluation du changement climatique	41
4.1	<i>La question du taux d'actualisation</i>	41
4.2	<i>Les fonctions de dommage</i>	43
4.3	<i>Les difficultés de l'approche coûts-efficacité</i>	44
5	Du bon usage des modèles	45
6	Annexes	48
6.1	<i>En quoi consistent les modèles climatiques ?</i>	48
6.2	<i>Quelles sont les méthodes d'évaluation et de validation des modèles climatiques ?</i>	49
6.3	<i>Comparaison prévision du PIB /réalisation sur 2001-2015 selon données du Fipeco</i>	52
6.4	<i>Quelques controverses en macroéconomie</i>	53
6.4.1	Les écoles de pensée référentes en matière de modélisation macroéconomique	53
6.4.2	Retour sur les faits stylisés de la croissance	55
6.4.3	Création monétaire et neutralité de la monnaie.	56
6.4.4	Multiplicateur de dépenses publiques et équivalence ricardienne	57
6.4.5	Les rendements décroissants ou constants	58
6.4.6	Les difficultés de l'usage de fonctions d'utilité	59
6.4.7	La théorie des anticipations rationnelles	59
6.4.8	L'existence d'une fonction de production agrégée	60
6.4.9	L'équation d'accumulation du capital : la variation du capital = investissement - dépréciation (constante)*capital.	61
6.5	<i>Les modèles énergétiques</i>	61

Introduction

Les modèles mathématiques sont d'un usage très général dans de nombreuses disciplines. Ils sont très développés en économie et couramment utilisés par les grandes institutions nationales ou internationales. Dans le domaine du changement climatique, deux grands types de modèles sont utilisés, les modèles physiques représentant le climat et son évolution et les modèles macroéconomiques visant à évaluer l'impact économique du changement climatique à venir et les politiques à envisager. En France par exemple, le CGDD (rattaché au ministère de l'environnement) vient d'évaluer l'impact de la Stratégie Nationale Bas Carbone¹, à partir du modèle Three-ME². Il affirme qu'elle pourrait se traduire par une hausse de 1,6 point de PIB en 2035 par rapport au scénario tendanciel. Le ministère des Finances avait auparavant évalué l'impact du Grenelle de l'environnement³ (plus exactement du plan tel qu'il a été présenté à l'époque), une grande consultation sur l'environnement conduisant à des lois et des programmes d'actions. Cette évaluation avait été faite en utilisant le modèle Mésange dont les résultats montraient au contraire un effet récessif à moyen terme. Les modèles sont aussi utilisés dans le groupe III du GIEC pour évaluer les politiques climatiques, et en particulier le niveau souhaitable d'une tarification du carbone (voir §4).

Les modèles permettant de faire des simulations et des évaluations quantitatives ont un impact significatif et souvent ignoré dans notre vie économique. Ces modèles macroéconomiques sont-ils fiables ? Comment les utiliser ? Quelle est leur limite de validité ?

Cette note de synthèse a pour but de comparer les modèles utilisés respectivement en météorologie / climatologie et en économie⁴, leurs capacités, leurs limites et leur usage. En effet, c'est bien parce que la météorologie utilise des modèles qu'elle peut faire des prévisions sur quelques jours et avec un indice de confiance chiffré. De même, les modèles de climat, qui partagent un certain nombre de caractéristiques avec les modèles météo, sont utilisés pour des projections à long terme et montrent que la température moyenne globale va croître, et augmenter de plus de deux degrés (objectif de l'accord de Paris) par rapport à la situation préindustrielle, si les émissions de gaz à effet de serre (GES) ne sont pas rapidement et fortement diminuées.

Les modèles, utilisés pour la prévision opérationnelle du temps qu'il fera, sont constamment évalués par comparaison des prévisions aux observations. De même, les modèles de climat sont évalués d'une part sur leur capacité à simuler le climat présent ou passé et d'autre part à reproduire les variabilités du climat à toutes les échelles de temps. Notons par ailleurs que la tendance au réchauffement qui est observée aujourd'hui est conforme aux projections qui

¹ Cf. *Stratégie Nationale Bas Carbone : une évaluation économique* (Nov. 2016) sur le site www.developpement-durable.gouv.fr/collection-thema#e5

² Cf. infra, note 45.

³ Cf. <https://alaingrandjean.fr/2010/12/19/bercy-tacle-le-grenelle-la-revanche-de-gribouille/>

⁴ En simplifiant, les premiers sont ou pourraient être utilisés dans les travaux du groupe I et II du GIEC ; les derniers dans le groupe III. Nous n'évoquerons pas ici le modèle World 3 de Meadows, créé pour une étude du Club de Rome parue sous le titre *The Limits to Growth* (en français, *Halte à la croissance ?*) en 1972. Cf. l'entrée « World3 » sur Wikipédia.org.

avaient été faites il y a une vingtaine d'années, ce qui apporte une certaine validité aux modèles utilisés à l'époque. Même si ces modèles étaient moins complexes que ceux utilisés actuellement, avec une résolution spatiale plus faible, les principaux processus physiques gouvernant le climat (notamment les termes du bilan d'énergie) étaient correctement résolus au 1^{er} ordre.

Ces modèles (météorologie et climat) ayant donc une capacité prédictive permettent de contribuer à fonder une décision politique. En est-il de même en économie ? La question est sensible pour deux raisons. D'abord, il est reconnu qu'aucun modèle économique n'a prévu la crise économique de 2008 ce qui a suscité une remise en cause de la discipline. Evidemment la science météorologique n'est pas non plus à l'abri d'erreurs de prévision. Mais l'ampleur du problème n'est clairement pas de même nature, comme on le verra. D'autre part, les évaluations économiques du changement climatique ont pendant longtemps conduit à un impact faible, peu mobilisateur pour l'action immédiate. Elles sont maintenant considérées largement comme erronées. C'est ce qui a conduit l'économiste Antonin Pottier à montrer dans un livre récent « *comment les économistes réchauffent la planète* »⁵.

Nous nous limiterons ici à une comparaison entre des modèles complexes : pour climat et météorologie, les « gros » modèles planétaires ; pour l'économie, les modèles macroéconomiques⁶. Nous n'évoquerons pas dans cette note les modèles énergétiques sectoriels (voir annexe 6.5) alors que leur emploi est fréquent dans le traitement de la question climatique, car ils posent des questions de nature (microéconomique) assez différentes des modèles macroéconomiques.

Notons qu'il y a différents types de modèles en macroéconomie, construits en fonction d'une question posée et qui diffèrent structurellement entre eux, bien plus que les modèles climatiques/météo qui, quelles que soient les échelles de temps, cherchent tous à représenter les mêmes types de processus physico-chimiques.

Tous ces modèles complexes, qu'ils soient météorologiques, climatiques ou économiques comportent de nombreuses équations, de nombreux paramètres et potentiellement de nombreuses données d'entrée et de sortie. Ce sont eux qui sont utilisés pour répondre aux questions politiques centrales que pose le changement climatique. Mais cette complexité fait qu'il est généralement impossible pour un non-spécialiste de comprendre le modèle sans un investissement très lourd en temps (afin qu'il devienne lui-même "spécialiste"). Le non-spécialiste ne connaît pas les hypothèses du modèle, son domaine de validité, et ne peut donc pas connaître la fiabilité de ses projections pour des études spécifiques.

Nous allons donc tenter de clarifier le paysage et, en conclusion, de proposer un mode d'emploi raisonné de ces modèles.

⁵ Titre de son livre sorti en 2016 au Seuil, Collection Anthropocène.

⁶ La finance, l'économie du transport, de l'énergie, la biologie, l'architecture et la construction,... de nombreuses disciplines utilisent des modèles mathématiques. Nous nous limitons ici à un champ (déjà très vaste) de la modélisation dans les trois domaines que sont la météo le climat et la macroéconomie. Pour une discussion épistémologique d'ordre général sur la modélisation, cf. *La modélisation critique*, Nicolas Bouleau, Quae, 2011.

1 Qu'est-ce qu'un modèle ? Comment se teste t-il ? A quoi sert-il ?

1.1 Qu'est-ce qu'un modèle ?

Nous appelons dans cette note modèle un système d'équations mathématiques (et de procédures de résolution) qui peuvent avoir des bases théoriques (physiques) ou empiriques intégrant des paramètres⁷ qui peuvent être ajustés sur la base d'études théoriques ou sur une base empirique.

Les modèles ingèrent ensuite des données d'entrée (conditions ou choix dont on veut analyser l'impact). Ils génèrent des données de sortie qui doivent aider à répondre à une question posée.

La plupart des équations, dans le domaine météorologique ou climatique, sont issues de lois physiques, chimiques ou biologiques⁸. Certaines équations sont empiriques (elles ne dérivent pas d'une théorie générale mais de l'observation des faits) et permettent de reproduire des phénomènes de petite échelle (dite « sous maille »), c'est-à-dire intervenant à des échelles trop petites pour être reproduites explicitement.

Chacun peut percevoir les limites des modèles météorologiques, le temps observé déviant souvent de ce qui était annoncé. Les limites des prévisions sont en partie liées à l'initialisation : l'aspect chaotique de l'atmosphère va amplifier une différence entre l'état initial "vrai" et la connaissance que nous en avons. Par ailleurs, les équations du modèle sont des approximations de la réalité, en particulier pour les processus de petite échelle. Malgré leurs limites, ces modèles météorologiques ont une réelle puissance prédictive.

Les modèles économiques comportent en général un mix d'équations comptables (c'est-à-dire des équations cohérentes en termes de stocks et de flux de revenus ; les modèles sont dits alors « stock-flux cohérents » : par exemple, les dettes des uns sont les créances des autres ; les charges des uns sont les produits des autres...), d'équations de comportement issues de la théorie économique dont ils dérivent (voir §3.4).

Voici quelques exemples de ces équations :

-la « courbe de Phillips » (du nom de l'économiste qui a fait⁹, en 1958, une courbe mettant en évidence une relation négative entre la hausse des salaires (l'inflation en fait) et le chômage dans l'économie britannique sur la période 1861-1957), qui fait un lien entre taux de chômage et hausse des salaires nominaux¹⁰. L'hypothèse sous-jacente est que les salariés sont moins capables d'obtenir des hausses de salaires en cas de chômage qu'en situation de plein emploi. D'autres économistes introduisent des équations d'équilibre : en l'absence de

⁷ Un paramètre est une valeur numérique qui n'est pas calculée par le modèle et qui n'est pas une variable d'entrée mesurée ou observée. Cf. David Makowski, *Estimation des paramètres des modèles « Principes généraux »*, 2005, Téléchargeable ici <http://bit.ly/2pNOBV5>

⁸ Cf. Annexe 6.1

⁹ Irving Fisher avant lui avait déjà remarqué cette relation.

¹⁰ Cf. Hervé Le Bihan, *1958-2008, Avatars et enjeux de la courbe de Phillips*, Revue de l'OFCE, 111, Octobre 2009. <http://www.cairn.info/revue-de-l-ofce-2009-4-p-81.htm>

« rigidités » du prix du travail, le marché du travail s'équilibrerait¹¹ et il n'y aurait pas de chômage structurel (mais que du chômage conjoncturel dû aux délais d'ajustement)...

-le niveau de l'élasticité de la part de la consommation dans le revenu par rapport au revenu (inférieure à 1, car, en général, plus notre revenu est élevé, plus nous épargnons, relativement à notre revenu).

- les fonctions de production agrégées, qui relient mathématiquement la production réalisée en volume à des quantités d'intrants (les facteurs de production), comme la fonction de Cobb-Douglas (voir § 3.4).

Il existe plusieurs manières d'attribuer des valeurs aux paramètres d'un modèle en économie. On distingue l'estimation et la calibration (ou calibrage) (voir § 3.6). L'estimation vise à se fonder sur des données observées en utilisant des outils statistiques plus ou moins sophistiqués de types algorithmes de minimisation dans des espaces complexes (ex : faire du maximum de vraisemblance). Le calibrage est une méthode plus sommaire, parfois inévitable (si par exemple les données sont de faibles profondeurs temporelles ou administrées) qui consiste à se fonder sur un « dire d'expert » ou à prendre, par exemple, une moyenne historique.

1.2 Comment se teste t-il ?

Les vérifications et les tests de validation d'un modèle sont en général les suivants :

- contrôle de la logique mathématique et de la cohérence interne (pas de propositions contradictoires au sein du modèle ou qui pourraient en être inférées), en particulier pour les modèles économiques respect des équilibres comptables ;
- discussion sur les équations et les paramètres, confrontation avec la littérature ;
- confrontation des données de sortie avec les données observées sur différents pas de temps.

Ces tests permettent d'évaluer la capacité du modèle à reproduire le passé, ou, après calibrage, à réaliser des prédictions confirmées. Pour être convaincants, ils doivent être explicités de manière transparente, soumis à la critique des pairs et si possible produits dans des revues spécialisées où cette lecture critique est formalisée. Notons que cela nécessite que les tiers aient accès à toutes les équations et paramètres du modèle mais aussi au code informatique du modèle sans quoi ces vérifications extérieures sont impossibles en toute rigueur. A ce jour, Bercy révisé et publie toutes les équations de MESANGE mais ne donne pas accès aux codes du modèle qu'il utilise pour faire les prévisions de PIB à court terme, si importantes dans la vie politique.

On peut affirmer que ces 3 tests sont faits pour les modèles climatiques et météorologiques. Pour la météo les travaux du Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (l'ECMWF)¹² montrent très clairement que la qualité des prévisions est réelle et s'améliore avec le temps. Pour le climat, la comparaison des projections de James Hansen

¹¹ Cf. www.crest.fr/ckfinder/userfiles/files/pageperso/roux/Cours/Philips_Transp.pdf

¹² Cf. *Evaluation of ECMWF forecasts, including 2014-2015 upgrades*, Haiden et al. (2015). Téléchargeable ici : <http://bit.ly/2eM0dEh>

faites en 1988 et ce qu'on observe aujourd'hui (sur la Température globale) est plutôt correcte¹³. De même, une analyse rétrospective des projections faites dans les différents rapports du GIEC montre un assez bon accord, malgré les variabilités interannuelles^{14 15}.

On peut dire aussi que pour les modèles économiques, les deux premiers tests sont faits en général (qui ne sont néanmoins pas tous « stock-flow cohérents ». Mais le troisième test (celui de la confrontation des données de sortie avec les données observées sur différents pas de temps) est plus difficile à interpréter, notamment parce que des décisions de politique publique peuvent modifier sensiblement le contexte. Nous y reviendrons.

L'exercice fait habituellement avec les modèles DSGE (voir §2.3) est d'ailleurs un peu différent : dans le papier fondateur des DSGE¹⁶, les auteurs développent un modèle simple et comparent les performances prédictives de ce modèle à celles d'un modèle VAR¹⁷ structurel utilisé en politique monétaire. Ils montrent que les performances du DGSE sont aussi bonnes que celles du VAR et concluent que la nouvelle génération de DSGE est suffisamment riche pour capturer certaines propriétés des données passées. Cette méthode de comparaison est souvent réutilisée ensuite. La plupart des économistes, y compris Wouters, font aujourd'hui des prévisions avec leur modèle DSGE en partant de 2008, comparent les données simulées aux données vraies, et montrent que les modèles n'étaient pas armés pour expliquer la crise. Ils modifient alors leur modèle de base et refont cet exercice de prévision à partir de 2008. Cela marche beaucoup mieux. Ils concluent que leur nouveau modèle est meilleur. On verra plus loin que le test clef est celui du back-testing (voir § 3.5)

1.3 A quoi sert un modèle ?

Un modèle peut avoir les différentes fonctions suivantes.

1.3.1 Tester quantitativement une théorie ou une hypothèse

Exemple : La modélisation du climat terrestre sur les 150 dernières années permet de simuler l'évolution du climat avec ou sans prise en compte du forçage radiatif causé par les émissions de GES d'origine anthropique. En comparant les résultats avec les observations, on peut ainsi quantifier la part anthropique dans le réchauffement. Cette approche a

¹³ Cf. *What do we learn from James Hansen's 1988 prediction?* Consultable sur le site : skepticalscience.com/Hansen-1988-prediction-advanced.htm

¹⁴ Cf. *Contrary to Contrarian Claims, IPCC Temperature Projections Have Been Exceptionally Accurate.* Voir ici : skepticalscience.com/contrary-to-contrarians-ipcc-temp-projections-accurate.html

¹⁵ Stouffer & Manabe (2017). *Assessing temperature pattern projections made in 1989.* *Nature Climate Change*, 7, 163-165.

¹⁶ F. Smets et R. Wouters, *An estimated stochastic dynamic general equilibrium model of euro area*, *Journal of the European Economic Association* (2003).

¹⁷ Les modèles statistiques du type VAR (vecteur auto-régressif) visaient initialement à faire des extrapolations statistiques, à partir des valeurs passées des variables dont on cherche à prévoir les valeurs futures, sans ambition a priori de représenter une théorie économique. Ils se sont complexifiés et quand les DGSE sont apparus ils servaient de référence dans le milieu académique.

Cf. *VAR et prévisions conjoncturelles*, E. Clément et J.-M. Germain (1993), Téléchargeable ici : <http://bit.ly/2qm6bkA>.

contribué à l'attribution du réchauffement depuis 1960 à l'influence humaine et non pas à l'influence de forçages naturels ou à la variabilité naturelle.

La démarche consiste, en partant d'un modèle physique représentant les différents processus qui pilotent le climat de la planète, à introduire ou non le changement de concentration en GES résultant des émissions anthropiques. On constate alors que les candidats alternatifs à l'explication du phénomène observé (la hausse de la température, son gradient selon l'altitude, un réchauffement plus important aux pôles...) tels qu'un changement d'activité solaire, le volcanisme, les modifications d'usage des sols, ou la variabilité naturelle, ne permettent pas de rendre compte des observations. A l'inverse, si l'on introduit en plus des forçages naturels la hausse des concentrations en GES dans le modèle, celui-ci reproduit convenablement les tendances observées¹⁸. Insistons ici sur la question du calibrage : cet exercice ne serait pas convaincant si l'ajustement des différents paramètres déterminait les résultats du modèle. En l'espèce, le lien entre concentration, effet de serre et impact sur le bilan énergétique de la Terre est basé sur des lois physiques, qui peuvent être testés en laboratoire. Ce lien ne dépend pas d'un calibrage quelconque. Il est cependant exact que certaines composantes du modèle nécessitent un calibrage. En effet, la variété et la complexité des processus physiques simulés dans les modèles de climats, ainsi que leurs interactions à différentes échelles spatiales et temporelles, doivent être résumées dans une série de sous-modèles approximatifs. La plupart de ces sous-modèles dépendent de paramètres incertains. Il est donc nécessaire de procéder à un ajustement de ces paramètres (i.e. un calibrage) afin d'obtenir une solution globalement en accord avec le climat observé. C'est un aspect essentiel de la modélisation climatique, qui a ses propres problématiques. La communauté scientifique apporte de ce fait une attention de plus en plus grande à la transparence de cet exercice crucial et sophistiqué¹⁹. L'utilisation de la capacité du modèle à représenter les tendances observées au cours des dernières décennies, soulève effectivement la question de l'indépendance entre données utilisées pour évaluer le modèle et données utilisées pour le mettre au point. A ce titre, la simulation des climats anciens est donc particulièrement intéressante, puisqu'elle permet de tester les performances des modèles pour des conditions très différentes de l'actuel.

En économie, il est difficile de valider ou invalider explicitement et formellement une théorie, d'abord dans la mesure où des décisions politiques (et les changements de doctrine économique sous-jacentes aux décisions politiques), pas faciles voire impossibles à prévoir, impactent la situation économique. Prenons l'exemple actuel du Brésil. Le gouvernement Temer vient de faire voter une loi stipulant que les dépenses gouvernementales de 2018 à 2038 (éducatives, santé, etc.) resteraient au niveau réel de 2018. Autrement dit, la part des dépenses gouvernementales dans le PIB brésilien devrait baisser chaque année à la vitesse de la croissance du PIB. Les résultats attendus de cette mesure (saluée par le FMI...) sont : 1) la baisse de l'endettement public par rapport au PIB et 2) une privatisation de l'économie. Mais le modèle GEMMES Brésil conclut à une hausse de la dette privée, au ralentissement de la croissance et à une hausse de la dette totale (publique plus privée). Les effets de ce

¹⁸ Pour une visualisation parlante : www.bloomberg.com/graphics/2015-whats-warming-the-world/

¹⁹ Cf. Hourdin et al. (2017). *The art and science of climate model tuning*. American Meteorological Society. <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00135.1>

programme sont donc massifs. Mais comment les prévoir avant l'élection du nouveau président et prévoir à l'avance un tel revirement ?

C'est difficile, d'autre part, car le comportement des agents économiques peut anticiper des changements de politique. Ce point est connu sous le nom de critique de Lucas²⁰ sur laquelle nous reviendrons : les relations empiriques entre paramètres d'un modèle pourraient changer si la politique change et ne pourraient donc pas servir à prédire l'effet d'une politique. Dit autrement l'idée de Lucas est que les agents économiques ajustent leur comportement à un changement de politique économique car ils en anticipent ses effets. A partir de là (c'est-à-dire depuis 1976) la modélisation a privilégié des modèles d'équilibre général intégrant des « anticipations rationnelles »²¹.

En revanche, les modèles économiques peuvent servir à justifier une théorie ou plus globalement une vision du monde, un « paradigme ». Les modèles d'équilibre général walrasiens²² postulent que l'économie est à l'équilibre de plein emploi, et ont été construits, au départ²³, pour représenter la théorie selon laquelle l'économie est à l'équilibre ou y retourne spontanément suite à un choc. Plus profondément, ces modèles peuvent justifier des mesures de politique économique qui donnent des résultats positifs dans ces modèles et pas dans d'autres, ou invalider des mesures qui n'en ont pas dans ces modèles mais en ont dans d'autres. On a cité plus haut le cas du Grenelle de l'environnement mais on pourrait citer celui des « mesures structurelles » de flexibilisation du marché du travail, qui sont nécessairement légitimées par des modèles conçus pour conduire au plein emploi, sous condition qu'il n'y ait pas de rigidités sur le marché du travail. On verra aussi que les modèles DSGE ont sans doute contribué à la thèse de la Grande Modération (voir §3.4). Dernier exemple, l'effet d'une relance budgétaire, dans un modèle qui suppose que les agents sont « ricardiens », est nul. On pourrait alors tirer des conclusions sur cette relance au vu des résultats du modèle, alors que ce sont les partis pris dès sa construction qui conduisent à ces conclusions (voir annexe 6.4.4).

1.3.2 Faire des prévisions.

Exemple : les modèles météorologiques permettent de faire des prévisions à court terme pour un certain nombre d'indicateurs²⁴. Il existe aussi des prévisions dites « saisonnières » qui donnent des grandes tendances en température et précipitation à quelque mois en avance²⁵. Pour la météorologie, on dispose d'un très grand nombre de situations qui permettent donc de quantifier la performance des prévisions²⁶. La qualité de ces prévisions peut être comparée à l'hypothèse de persistance (il fera dans les prochains jours le même temps que ce qui est observé aujourd'hui) et à l'hypothèse de climatologie (il fera le même temps que la moyenne observée pour la même date dans le passé). Sur quelques jours, les

²⁰ Cf. l'entrée « Critique de Lucas » sur Wikipédia.org

²¹ La théorie des anticipations rationnelles est pour le moins... étonnante. Cf. annexe 6.4.7.

²² Cf. annexe 6.4.1

²³ Ils peuvent maintenant être utilisés et développés autrement, cf. § 2.3.

²⁴ Cf. l'entrée « Prévision météorologique » sur Wikipédia.org.

²⁵ Aujourd'hui, ce type de prévision donne des résultats intéressants dans les zones tropicales, mais pas aux moyennes latitudes.

²⁶ Cf. *Evaluation of ECMWF forecasts, including 2014-2015 upgrades*, op. cit.

prévisions météorologiques faites avec des modèles complexes ont une performance bien supérieure à celle de la persistance ou de la climatologie.

Les modèles de conjoncture (par exemple, Mésange en France) font des prévisions à court terme (trimestre et année) très importantes pour la gestion budgétaire de l'Etat. Les modèles utilisés par les grandes institutions internationales le font à plus long terme et ont été violemment critiqués pour ne pas avoir prévu la crise de 2008.

Les modèles climatiques permettent de faire des projections²⁷. Ces projections sont :

- conditionnelles : « si les émissions de GES sont de tel niveau, ou si la concentration de GES/CO2 est de tel niveau, alors la température moyenne planétaire va augmenter de tant (et d'autres indicateurs vont varier de telle manière) ».

- probabilistes : la réalité future sera la juxtaposition de la tendance lente « forcée » et de la variabilité naturelle du climat. Les observations reflètent une réalisation de l'évolution climatique. Ainsi, si l'on regarde a posteriori les projections climatiques qui avaient été faites pour les années 90, aucune n'avait prédit l'événement El Nino de 1998. Les événements El Nino, quoique relativement périodiques, relèvent de la variabilité naturelle. En revanche, on attend des modèles climatiques qu'ils soient capables de simuler le climat avec variabilité interannuelle et qu'ils puissent donc nous renseigner sur la fréquence à laquelle un type d'événement particulier pourra se produire. Ainsi, l'évolution de la fréquence et de l'intensité des événements El Nino dans un monde globalement plus chaud est un important sujet de recherche actuel.

Ces deux caractéristiques les différencient fondamentalement de « prévisions », au sens météorologique du terme.

Ces projections conditionnelles dépendent des modèles mais l'analyse de l'ensemble de ces projections permet d'en faire une consolidation en fourchette (si la concentration en CO2 double par rapport à son niveau préindustriel (280 ppm), la moyenne de la température planétaire augmente de A à B degrés d'ici 2100, avec un degré de confiance de X%). Notons que, pour arriver à ces intervalles de confiance, les climatologues utilisent un ensemble de modèles qui ont été développés par des équipes différentes. Ces modèles ne sont pas entièrement indépendants les uns des autres et partagent certaines paramétrisations, parfois certains composants (module d'atmosphère ou d'océan par exemple). Aucun modèle n'est meilleur que les autres sur tous les aspects. On fait l'hypothèse que cet ensemble de modèles reproduit la gamme d'incertitude. C'est là une hypothèse forte puisqu'on ne peut pas exclure l'existence d'un processus qui n'est modélisé par aucun des modèles. C'est par exemple le cas pour la stabilité des calottes polaires. La dynamique de ces calottes est encore mal connue, et certains proposent des processus auto-amplificateurs, qui pourraient conduire à une fonte rapide d'une partie des calottes, conduisant à une hausse du niveau marin beaucoup plus rapide que ce qui était envisagé dans le dernier rapport du GIEC. Le caractère potentiellement instable des calottes est suggéré par l'analyse d'archives climatiques indiquant un niveau marin supérieur à l'actuel de plusieurs mètres lors du dernier interglaciaire (il y a environ 100 000 ans), période à peine plus chaude que

²⁷ Pour discussion approfondie sur la confiance que l'on peut avoir dans les projections climatiques voir Baumberger et al. (2017). *Building confidence in climate model projections: an analysis of inferences from fit*. WIREs Climate Change, Vol. 8, issue 3.

l'actuelle²⁸. Par ailleurs, les archives paléoclimatiques ont également mis en évidence l'existence d'épisodes de décharges massives d'icebergs dans l'Atlantique Nord au cours de la dernière période glaciaire, épisodes coïncidents avec des changements climatiques brutaux dans certaines régions.

Il devrait être possible en économie de faire ce type de projections conditionnelles. Pour reprendre l'exemple du Brésil cité ci-dessus, il devrait être possible, à programme politique connu, de tester les performances comparées des prévisions des différents modèles.

Faire des projections qui permettent d'évaluer une politique publique ou d'évaluer des coûts de scénarios

De nombreux modèles évaluent des scénarios et proposent des projections qui ont deux caractéristiques :

- elles ont passé le test de cohérence,
- elles sont évidemment le résultat de l'ensemble des hypothèses du modèle et du scénario retenu.

Ce ne sont pas des prévisions au sens où si toutes les hypothèses du scénario se vérifiaient alors les données de sortie du modèle seraient conformes aux données réelles. Dans le domaine économique, on ne peut jamais affirmer cela même en ordre de grandeur. Il y a deux grandes raisons à cela.

D'une part l'économie implique l'humain qui peut avoir des comportements collectifs non modélisables : qui pouvait prévoir la guerre de 1914 et sa durée ? Comment modéliser des anticipations, qui jouent un rôle évident dans les décisions économiques mais ne sont pas nécessairement stables dans le temps ? Comment prévoir telle ou telle décision de politique économique qui peut avoir un impact économique majeur (on a cité l'exemple plus haut de l'inflexion de la politique brésilienne) ? Comment tenir compte d'interactions nombreuses et complexes, de ruptures innombrables (comme l'apparition d'une innovation technologique par exemple) et du fait que les agents prennent des décisions en situation d'information imparfaite et d'incertitude forte avec des critères de choix qui ne sont pas exclusivement économiques.

D'autre part, il n'y a pas ou très peu, même en période de relative stabilité (et de continuité de politique économique), de lois économiques universelles, au sens où la loi de la gravitation l'est sur la planète. Notons cependant que l'incapacité des modèles dominants en 2007 à prévoir la crise est due aussi à des simplifications intrinsèques et excessives de ces modèles que les modélisateurs tentent de corriger en ce moment (voir § 3.4).

Dans le domaine climatique, les projections faites, conditionnelles aux scénarios d'émission de GES ont une propriété stratégique dans le débat public : on peut affirmer que, si les hypothèses du scénario projeté sont réalisées, alors les données de sortie du modèle seront conformes avec les données réelles, avec un certain degré d'incertitude, qui peut être chiffré en fonction de l'horizon de temps et de la donnée de sortie choisie. C'est vers cet horizon que la modélisation économique doit tendre.

²⁸Hansen et al. *Ice melt, sea level rise and superstorms: evidence from paleoclimate data, climate modeling, and modern observations that 2 °C global warming could be dangerous*, Atmos. Chem. Phys., 16, 3761-3812, doi:10.5194/acp-16-3761-2016, 2016.

1.3.3 Aider à la décision.

Les décideurs politiques peuvent souhaiter évaluer les conséquences (souvent sous forme de « coûts ») de telle ou telle décision et intégrer dans leur réflexion les évaluations fournies par un modèle. On pourrait soutenir l'idée que dans ce cas, les modèles utilisés ne doivent pas nécessairement chercher à reproduire la réalité dans son ensemble mais à se concentrer sur la question posée. C'est le cas des modèles utilisés par les banques centrales pour apprécier les effets de leur décision de politique monétaire. C'est aussi le cas des modèles utilisés pour évaluer le niveau du ou des prix carbone nécessaires pour qu'un pays respecte ses engagements de trajectoire d'émissions de GES.

2 Quelques exemples de modèles dans les trois domaines

2.1 Climat

-modèles climatiques globaux visant à estimer température, et autres données physiques (pluviométrie, vitesse des vents...) à l'avenir, en fonction d'hypothèses sur les émissions de GES ; ces modèles sont faits à partir d'une représentation de l'atmosphère, des océans, des surfaces continentales et de leurs interactions. 23 centres de recherche dans le monde (dont 2 en France²⁹) ont fourni des résultats de simulation pour les inter-comparaisons du GIEC³⁰.

Ex : Le centre de modélisation du climat de l'IPSL³¹ développe un modèle intégré du système climatique à travers une approche multidisciplinaire couvrant les différentes parties du système climatique et les différents processus qui le régissent. Il développe et améliore constamment son modèle et les diverses parties qui le constituent :

- le modèle d'atmosphère LMDZ qui décrit la dynamique de l'atmosphère, la génération des nuages, et les interactions entre l'atmosphère, le rayonnement solaire et le rayonnement infrarouge, qui pilotent le bilan énergétique de la Terre ;
- le modèle d'océan, de glace de mer et de bio-géochimie marine NEMO ;
- le modèle de surfaces continentales, qui décrit la dynamique de la végétation en interaction avec le climat et les différents flux de surface, ORCHIDEE ;
- les modèles de chimie troposphérique INCA et stratosphérique REPROBUS

Le couplage entre les modèles atmosphérique et océanique est réalisé à l'aide du coupleur OASIS développé au CERFACS.

2.2 Météo

Les modèles météorologiques visent à estimer température, et autres données physiques (pluviométrie, vitesses des vents...) pour un avenir proche, en décrivant une décomposition fine de l'atmosphère, à l'échelle territoriale visée. Ces modèles ont bien sûr des points communs avec les modèles climatiques, notamment pour la modélisation de l'atmosphère. Cependant, contrairement aux modèles de climat, ils nécessitent de connaître l'état initial du système avec précision. La qualité de la prévision météo dépend donc entre autres de la qualité des observations disponibles et du schéma d'assimilation de ces observations permettant de construire la meilleure estimation possible de cet état initial. Par ailleurs, ils

²⁹ Les deux modèles développés et utilisés par la communauté scientifique française sont au CNRM (Météo-France et CERFACS) et à l'IPSL (Institut Pierre Simon Laplace). Un programme complémentaire, nommé Cordex (Coordinated Regional Downscaling Experiment), définit le cadre général pour la régionalisation des simulations climatiques et l'inter-comparaison des résultats à petite échelle sur des domaines limités. cf http://www.insu.cnrs.fr/files/onerc_decouvrir_scenarios_giec.pdf

³⁰ Ces résultats sont coordonnés dans le cadre du projet CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project, phase 5), cf. cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/availability.html.

³¹ Cf. <https://www.ipsl.fr/Organisation/Les-structures-federatives/Le-Centre-de-modelisation-du-climat>

ne nécessitent pas de prendre en compte la dynamique des composantes qui évoluent sur les grandes échelles de temps. Ainsi, un modèle de prévision météorologique ne cherchera pas à simuler la dynamique des calottes de glace ou l'évolution de la végétation avec le changement climatique.

ex : en France Météo-France dispose de trois modèles³² : un modèle planétaire (ARPEGE), un modèle régional à plus fine échelle (ALADIN), et enfin le modèle AROME dont l'échelle est encore plus fine afin de reproduire les processus de petite échelle sur la France et les pays voisins.

2.3 Economie

- modèles statistiques du type VAR³³ ;
- modèles de prévision conjoncturelle (Mésange, Egée et Opale à Bercy) : valeurs futures du PIB, de l'emploi, de l'inflation, etc. à horizon de quelques mois à deux ans.
- modèles «d'évaluation intégrée» (Integrated Assessment Models, IAM) visant à évaluer les effets économiques du changement climatique et analyser les questions d'atténuation. Aujourd'hui, il existe deux grandes classes de modèles IAM dans le domaine énergie-climat. D'une part, les modèles dit «process-based integrated assessment models»³⁴, parfois appelés modèles E3 pour économie-énergie-environnement, qui représentent les déterminants et mécanismes en jeu dans l'évolution des systèmes énergétiques et économiques. Ils se placent dans un cadre coût-efficacité. On peut citer l'exemple d'Imaclim-R développé par le CIRED. D'autre part les modèles IAM d'analyse coûts- bénéfices (comme DICE développé par William Nordhaus qui en est le précurseur, PAGES³⁵, FUND, etc.) qui représentent dans un même cadre impacts et atténuation du changement climatique. Ils reposent, d'une part, sur une fonction de bien-être social, le plus souvent basée sur une maximisation intertemporelle de l'utilité inspirée du modèle de Ramsey et sur une représentation de l'économie agrégée, et, d'autre part, sur une modélisation des interactions entre les émissions de GES, les hausses de température et les dommages économiques. Ces modèles passent par des fonctions d'abattement et de dommages, sur lesquelles nous reviendrons (§ 4.3).
- modèles macroéconomiques théoriques visant à élucider tel ou tel phénomène agrégé. A la différence des précédents, ces modèles ne sont pas nécessairement estimés ou calibrés sur des données empiriques. Il n'empêche qu'ils sont généralement considérés comme une première étape avant la construction d'une version estimée et exercent une influence non-négligeable sur les débats entre économistes. Parfois, ces modèles sont considérés en regard de données empiriques dont ils sont supposés fournir une interprétation ou "raconter l'histoire". C'est le cas, par exemple, des

³² Voir sur le site de Météo France : <http://bit.ly/2gMGpn4>

³³ Cf. note 17.

³⁴ Voir Sathaye, Jayant, et P. R. Shukla. 2013. *Methods and models for costing carbon mitigation*. Annual Review of Environment and Resources 38: 137-68.

³⁵ Qui a été utilisé par Nicholas Stern en 2006 dans son célèbre rapport *Stern Review on the Economics of Climate Change*.

modèles invoqués dans les travaux de Thomas Piketty, par exemple, dont aucun n'est estimé sur des données réelles. Cette pratique peut s'avérer fructueuse lorsqu'elle permet l'identification de "faits stylisés" corroborés à la fois par les données et par la logique du modèle. Cependant, il ne peut s'agir, au mieux, que d'une étape intermédiaire destinée à faciliter la confrontation méthodique du modèle avec les données. En effet, comme le remarque Antonin Pottier, cette juxtaposition d'un modèle abstrait et de données empiriques sans que le premier ne soit confronté aux secondes autorise les épistémologies les moins rigoureuses, dissimulées derrière des "histoires comme ça" (so stories).

Dans cette catégorie de travaux, nous intéressent tout particulièrement les modèles qui relèvent de la toute récente "macro-économie écologique"³⁶. La plupart, en effet, s'efforcent de rendre compte de l'interaction entre les ressources naturelles et l'économie au sens néoclassique du terme.

- modèles macroéconomiques visant à estimer les effets de telle ou telle politique publique : Mésange (Bercy), Three-Me (OFCE/ADEME), Imaclim (CIRED), Nemesis (Erasmus), Gemini (Lausanne), GEM E3 (Commission Européenne), Markal, GEMMES (AFD, chaire énergie et prospérité), etc. Certains d'entre eux sont utilisés pour déterminer, via un arbitrage « coût-efficacité », les actions les moins coûteuses permettant d'atteindre les objectifs de réduction de CO2 préalablement fixés. Ils sont en général multisectoriels.

Tous ces modèles sont faits à la maille nationale, régionale ou mondiale, et peuvent avoir une ou plusieurs périodes de projections. Les modèles représentent soit le comportement d'un agent économique (voire deux) dit représentatif (c'est le cas des modèles d'équilibre général calculable) soit des fonctions agrégées (comme par exemple la demande agrégée).

On peut distinguer en s'inspirant d'une note de France-Stratégie³⁷ :

A-Les modèles macroéconomiques d'équilibre³⁸

*A1 Les modèles d'inspiration néo-keynésienne³⁹

Ces modèles s'appuient sur un schéma néo-keynésien d'ajustement à court terme par les quantités, et prolongent les comportements passés (en France par exemple, on peut citer les

³⁶ Cf. le numéro 121 (216) de la revue *Ecological Economics* et son introduction par Armon Rezaei et Sigrid Stagl, *Ecological macroeconomics: Introduction and review* (pp 181-185) et l'article de Lukas Hardt et Daniel W. O'Neill, *Ecological Macroeconomic Models: Assessing Current Developments*, *Ecological Economics* 134 (2017) 198–211.

³⁷ Cf. Les modèles macroéconomiques Tome 2, A. Ayong Le Kama et Q. Roquigny, 2013, Téléchargeable ici <http://bit.ly/2pBkdSD>, et *Une comparaison des modèles macro-économétriques et DSGE dans l'évaluation des politiques économiques*, J.-P. Laffargue, 2012, www.insee.fr/fr/ffc/docs_ffc/ES451F.pdf, et enfin *VAR et prévisions conjoncturelles*, op. cit.

³⁸ Cf. également *La nouvelle modélisation macroéconomique appliquée à l'analyse de la conjoncture et à l'évaluation des politiques économiques*, A. Épaillard, J.-P. Laffargue et P. Malgrange (2008), *Économie et Prévision* n°183-184, www.cairn.info/revue-economie-et-prevision-2008-2.htm

³⁹ Les termes désignant les écoles d'inspiration sont explicités dans l'annexe 6.3.1.

modèles NEMESIS et MESANGE). La demande finale de biens est le principal déterminant du fonctionnement de l'économie. Du fait des délais d'ajustements des quantités, ces modèles peuvent admettre des déséquilibres temporaires : sous-utilisation des capacités de production, chômage involontaire, etc. »

*A2 Les modèles d'équilibre général calculable inspirée de la Nouvelle économie classique

Ces modèles s'appuient sur une représentation 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'utilité⁴⁰.

Il y a toute une diversité de modèles de ce type (les questions 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. Les modèles IAM sont en général des modèles CGE incorporant une « boucle climat », d'où l'adjectif « intégré ». Outre ceux cités plus haut (DICE, PAGES et FUND) on peut citer le modèle EPPA⁴¹ de John Reilly (MIT) qui a servi à la Chine et au Mexique pour faire leur NDC⁴². Le modèle GEMINI fait aussi partie de la famille des modèles « walrasiens ».

Les modèles DSGE⁴³ sont des CGE dynamiques et stochastiques. La philosophie initiale de ces modèles, maintenant très variés, est de représenter l'effet sur l'économie de chocs, en supposant des agents économiques réagissant par anticipations rationnelles. 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.

Les grandes institutions internationales (le FMI, la BCE) utilisent toujours cette catégorie de modèles, même si elles disposent toujours de modèles, de natures différentes, qui sont comparés : un DSGE estimé (GIMF au FMI, NAWM à la BCE) et un modèle « néokeynésien » (FSGM pour le FMI, MCM à la BCE) ; la banque mondiale utilise un modèle CGE.

⁴⁰ Cf. annexe 6.4.

⁴¹ Cf. *The MIT Emissions Prediction and Policy Analysis (EPPA) Model: Version 4*, Paltsev et al. (2005), ledsgp.org/wp-content/uploads/2015/09/MIT-EPPA-model1.pdf

⁴² Contribution nationale volontaire, en préparation de la COP21 qui donne une indication de la trajectoire carbone du pays.

⁴³ Cf. l'entrée « Modèles d'équilibre général dynamique stochastique » sur Wikipédia.org.

Notons que le Cepremap⁴⁴ développe l'outil Dynare pour résoudre, simuler et estimer des modèles DSGE mais aussi d'autres types de modèles. L'équipe intègre aujourd'hui des approches nouvelles qui répondent à une partie des critiques faites à ce jour aux modèles DSGE. Ces innovations sont utilisées avant tout par les chercheurs et par certaines institutions publiques comme les banques centrales.

Les modèles DSGE dans le monde

Bon nombres de pays européens détiennent aujourd'hui leur propre modèle DSGE visant à représenter leur économie dans leur ensemble :

- Allemagne : Pytlarczyk (2005)
- Brésil : modèle SAMBA de la Banco Central do Brasil
- Canada : ToTEM de Murchison et Rennison (2006)
- Espagne : BEMOD de Andrés et al. (2006) et MEDEA de Burriel et al. (2010)
- Etats-Unis : SIGMA de Erceg et al. (2006)
- France : entre autres, OMEGA3 de Carton et Guyon (2007) et récemment Adjemian et Devulder (2011)
- Finlande : AINO de Kilponen et Ripatti (2006)
- Norvège : NEMO de Brubakk et al. (2006)
- Portugal : Almeida (2009)
- Royaume-Uni : BEQM de Harrison et al. (2005) et DiCecio et Nelson (2007)
- Slovaquie : Senaj et al. (2010)
- Suède : Curdia et Finocchiaro (2005) et RAMSES de Adolfson et al. (2007b)
- Zone Euro : on peut recenser deux modèles utilisés par la BCE, NAWM de Christo_el et al. (2008) et celui de Christiano et al. (2010), et un par la Commission, QUEST III de Ratto et al. (2009). D'autres modèles encore s'intéressent plus particulièrement à la politique budgétaire dans la zone euro, comme FIMOD de Forni et al. (2009) ou Stahler et Thomas (2011)
- International et blocs de pays : GIMF de Botman et al. (2008) et Kumhof et al. (2010) pour le FMI et EAGLE de Gomes et al. (2010).

⁴⁴ Centre pour la Recherche Economique et ses Applications.

B - Les modèles macroéconomiques de déséquilibre

Le modèle Three-ME⁴⁵ est, dans le choix terminologique retenu ici, un modèle d'inspiration « post-keynésienne ». Contrairement aux modèles CGE standards, il n'y a pas d'ajustement offre/demande par les prix, lesquels s'ajustent suivant une autre dynamique, celle, justement, des coûts unitaires (plus un mark-up). La production est multisectorielle et les salaires sont déterminés par une courbe de Phillips de court terme. Il a été réalisé pour permettre l'évaluation pour la France des impacts des politiques énergétiques et environnementales.

Les modèles macroéconomiques « à la Goodwin- Keen »⁴⁶, comme le modèle GEMMES47, beaucoup moins répandus, contiennent des équations non linéaires et une dynamique hors équilibre inter-temporelle (ils peuvent diverger ou converger selon les cas et les hypothèses). Ils s'inspirent des équations de Lotka-Volterra représentant des dynamiques proies-prédateurs⁴⁸ et intègrent d'entrée de jeu la dette privée, la répartition de la valeur ajoutée (entre salaires et revenus du capital) et le sous-emploi comme variables déterminantes du cycle monétaire endogène. Ils peuvent ainsi rendre compte de crashes de surendettement dans la logique de Hyman Minsky⁴⁹, et de dépressions déflationnistes. Richard Goodwin produit un premier modèle de ce type en 1967. Georges Akerlof et Joseph Stiglitz en ont fait un en 1969, en tenant compte du caractère non-substituable ex post des différentes générations de capital installé. Ces modèles prennent en compte des dynamiques chaotiques et autorisent l'émergence de comportements agrégés (d'investissement, de consommation, de fixation des salaires) qui ne se réduisent pas à une somme de comportements micro-économiques. Ils sont en revanche en général assez frustrés face à la complexité d'une économie réelle, instables et sensibles aux paramètres (car ce sont des modèles non-linéaires) voir infra. Ils n'ont à ce jour pas été utilisés pour faire

⁴⁵ Développé depuis 2008 par l'OFCE et l'Ademe, c'est un modèle multisectoriel : il considère 24 secteurs économiques (agriculture, services non marchands, sidérurgie, transport ferroviaire, production d'énergie, etc.), ce qui permet d'analyser les effets des transferts d'activité d'un secteur à un autre (en termes d'emploi, d'investissement, d'importations, etc.). Il considère quatre facteurs de production (le capital, le travail, les consommations intermédiaires et l'énergie) et 17 types d'énergie (pétrole, biocarburant, nucléaire, gaz, géothermie, éolien, etc.) plus ou moins substituables. Cf. <https://www.ofce.sciences-po.fr/pdf/documents/threeme/doc1.pdf>

⁴⁶ Cf. l'entrée « Goodwin model (economics) sur Wikipédia.org et Steve Keen, *A Monetary Minsky Model of the Great Moderation and the Great Recession*, Journal of Economic Behavior and Organization, 2013.

⁴⁷ Cf. les travaux de construction du modèle GEMMES à l'AFD, et *Coping with the Collapse: A Stock-Flow Consistent Monetary Macrodynamics of Global Warming*, Giraud et al., Papiers de recherche de l'AFD n°29, 2017.

⁴⁸ En quelques mots, ce type de modèles met dans son cœur la tension suivante dans la répartition profit-salaires : des salaires trop élevés et des profits trop faibles conduisent à des sous-investissements défavorables à terme à l'activité économique ; à l'inverse des salaires trop faibles dépriment les ventes et, à terme, les profits et la capacité d'investissement des entreprises.

⁴⁹ Dans les années 1960, Hyman Minsky a développé une interprétation de l'instabilité intrinsèque d'une économie marchande qui radicalise les intuitions de Harrod-Domar et contraste fortement avec la stabilité postulée du modèle de Solow. Voir Hyman Minsky, *Stabiliser une économie instable*, Institut Veblen, Les petits matins, 2016.

des prévisions⁵⁰. L'économiste Steve Keen par exemple avait prédit (non pas en se fondant sur les résultats explicites du modèle, mais en appuyant son raisonnement sur sa logique) que l'effondrement du système financier était possible, il n'avait pas dit que cet effondrement arriverait en 2008.

Ce n'est que très récemment que des travaux de recherche visent, à partir de ces idées conceptuelles, à représenter l'ensemble de la vie économique⁵¹, mais du coup, avec peu de détails sectoriels, à ce stade Il faut donc attendre avant d'en savoir plus sur la capacité prédictive (éventuellement conditionnelle comme pour le climat) de ces modèles. En revanche, on peut espérer dès maintenant qu'ils puissent apporter matière à réflexion face à des risques de crises financières et puissent devenir des outils de gestion de ces risques.

⁵⁰ Bien que "*Coping with Collapse*" (op. cit.) développe une version estimée à l'échelle mondiale qui permette d'analyser des scénarii macro-économiques dépendant du dérèglement climatique.

⁵¹ Néanmoins, "*A Multisectoral, Monetary and Stock-Flow Consistent Framework for Brazil*", D. Bastidas, et al. (2017) propose une première approche de l'économie brésilienne dans une version à 8 secteurs en économie ouverte.

3 Différences entre modèles climatiques et modèles économiques

Notons d'abord deux différences essentielles.

La climatologie et la météorologie représentent des interactions complexes entre des éléments complexes dont la réaction en fonction des observables est certes probabiliste mais peut être décrite par des équations dont les bases physiques ont été validées. Plus précisément, les modèles de climat reposent sur de nombreuses équations physiques fondamentales décrivant par exemple la conservation du moment et de l'énergie, la conduction de la chaleur, le transport radiatif...etc. La résolution numérique de ces équations requiert leur discrétisation spatiale et temporelle, une méthode numérique, ainsi que diverses hypothèses et approximations afin de rendre le problème soluble, même avec l'importante puissance de calcul actuellement disponible. Ces choix méthodologiques ont bien sûr un impact sur les résultats et sont discutés au sein de la communauté scientifique. Cependant, ce ne sont donc pas les lois physiques de base, validées par ailleurs, qui sont discutées mais bien la façon dont elles sont implémentées et résolues.

L'économie représente des interactions complexes (système) entre des unités de décision (les humains) complexes dont la description du comportement par des équations mathématiques **reste à valider**. Par ailleurs, si la totalité des modèles utilisés pour le climat ou la météorologie est compatible avec les deux premières lois thermodynamiques⁵², en revanche, la très grande majorité des modèles utilisés en économie viole ces deux lois⁵³, en affirmant, par exemple, qu'il est possible de créer du PIB sans extraire de ressources naturelles (énergie dissipée ou matière transformée⁵⁴). Si l'on en croit Sir Arthur Eddington,

⁵² Qui s'expriment simplement : la quantité d'énergie se conserve à travers tous les processus physiques mais la qualité entropique de l'énergie se dégrade nécessairement. Un exemple simple à l'usage des non-physiciens : l'énergie contenue dans un litre d'essence brûlé par un moteur à explosion ne disparaît pas. Une partie est convertie en énergie cinétique qui permet de déplacer la voiture, une autre est dissipée sous forme de chaleur. L'énergie cinétique elle-même finira tôt ou tard par être également dissipée (e.g., au niveau des freins) ; les ingénieurs travaillent pour en récupérer une partie dans les voitures et dans les trains et tramways (voir <http://bit.ly/2pw7nQv>). Mais la chaleur émise in fine ne pourra pas être récupérée dans ce cas (elle peut l'être en partie par exemple dans des dispositifs de chauffage « à condensation ») pour fournir à nouveau un travail. Elle est donc perdue. Cela se traduit par une augmentation de l'entropie associée aux activités humaines.

⁵³ Il n'en a pas toujours été ainsi : les physiocrates français -au premier rang desquels, Cantillon et son *Essai sur la Nature du Commerce in Général* (1730) et Quesnay avec son *Tableau Economique* (1759)- considéraient la Terre et ses ressources comme l'unique source de la valeur. Postuler l'unicité est sans doute aussi exagéré que le monisme de la valeur travail marxienne. Mais supprimer les ressources naturelles de la liste de ce qui contribue à donner une valeur et un sens aux choses, comme le fait la majorité de l'économie néo-classique, est absurde. L'école de Piero Sraffa, et en particulier Ian Steedman, est l'une des seules, en économie, qui tient, à juste titre selon nous, que les ressources naturelles et le travail contribuent à la valeur.

⁵⁴ La seule façon dont une telle opération pourrait avoir lieu serait que le PIB gonfle par le seul effet des prix sans relation aucune avec les fondamentaux réels de l'économie. Ce n'est pas impossible mais c'est justement ce type de phénomène de pure rente que la théorie néo-classique exclut de son champ d'étude.

pareille effraction, non seulement n'est pas anecdotique mais encore obère la scientificité des propositions issues de tels modèles économiques :

“The law that entropy always increases holds, I think, the supreme position among the laws of Nature. If someone points out to you that your pet theory of the universe is in disagreement with Maxwell's equations — then so much the worse for Maxwell's equations. If it is found to be contradicted by observation — well, these experimentalists do bungle things sometimes. But if your theory is found to be against the second law of thermodynamics I can give you no hope; there is nothing for it but to collapse in deepest humiliation.”⁵⁵ “

« Je pense que la loi selon laquelle l'entropie augmente toujours tient la place suprême parmi les lois de la Nature. Si quelqu'un fait la démonstration que votre théorie favorite de l'univers est en désaccord avec les équations de Maxwell, alors tant pis pour lesdites équations. Si l'on trouve qu'elle contredit l'observation, eh bien, disons que les expérimentateurs font parfois des ratés. Mais s'il se trouve que votre théorie viole la seconde loi de la thermodynamique, je n'ai aucune espérance à vous offrir : votre théorie est condamnée à s'abîmer dans l'humiliation la plus profonde. »

Rares sont les travaux d'économistes qui tentent de remédier à cette difficulté. Georgescu-Roegen, Ayres et Kümmel comptent parmi les pionniers de cette préoccupation, pour laquelle les données de flux réels (matière, énergie) font en grande partie défaut ou sont en cours d'élaboration. Hall et al. (2001) plaident pour la prise en compte rigoureuse des contraintes issues du monde physique dans l'analyse économique⁵⁶.

Au-delà de ces différences d'ordre général, voici maintenant des différences plus précises, qui permettent de mieux comprendre les limites des uns et des autres.

3.1 L'extension et l'exhaustivité de la représentation

Du fait des connaissances accumulées en physique et en biologie, les modélisateurs en météo ou en climatologie affinent progressivement leurs modèles. Ainsi, les premiers modèles de végétation ne modélisaient que le cycle du carbone. On a ensuite introduit le cycle de l'azote, qui peut être un élément limitant pour la productivité végétale dans certaines régions et ainsi modifier les résultats du modèle. Cette complexification se fait par un retour permanent entre les résultats et les observations. Ainsi, c'est la découverte récente des mécanismes d'instabilité et d'écoulement rapide des calottes de glace qui a motivé la prise en compte de ces phénomènes dans les modèles les plus récents et intensifié la recherche pour le couplage dynamique des modèles de climat et de calottes. Par ailleurs les climatologues savent décrire des « conditions aux limites » souvent clefs dans la fiabilité du modèle.

⁵⁵ Sir Arthur Stanley Eddington, *The Nature of the Physical World* (1915), chapter 4

⁵⁶ Giraud et Lantremange (2017) fournissent une tentative dans cette direction, compatible avec les modèles hors équilibre du type ThreeMe ou Gemmes.

Les modèles macroéconomiques les plus généralement utilisés (les modèles d'équilibre général) sont quant à eux insuffisamment exhaustifs.

-Les agents sont très (trop !) agrégés (avec un ou deux agents représentatifs des ménages ou des entreprises). En particulier, l'impact des inégalités sociales est souvent de ce fait sous-estimé, par construction. Quelques modèles DSGE intègrent des agents hétérogènes, mais ils sont longtemps restés marginaux⁵⁷. Ce n'est qu'assez récemment qu'ils sont repris par un plus grand nombre de chercheurs⁵⁸.

-Le secteur bancaire n'est majoritairement pas représenté en tant que tel (car pour de nombreux économistes, monnaie et finance sont neutres⁵⁹)

-La monnaie est souvent exogène (pour la même raison) alors qu'il est clair qu'elle est endogène⁶⁰.

-Les dettes des agents privés ne sont souvent mal représentées (du fait de l'unicité de l'agent représentatif). Il est parfois argumenté que ce n'est pas très grave puisque ces dettes ont forcément des créances en contrepartie, les annulant au niveau macroéconomique. Les travaux d'économistes comme Irving Fisher puis plus récemment Steve Keen⁶¹ sur le lien dette-déflation, montrent les risques de ce parti pris.

-Ils n'intègrent pas le fait que des facteurs déterminants de l'évolution économique (comme les cours de titres boursiers, des énergies fossiles ou des matières premières minérales ou agricoles) peuvent connaître des évolutions « chaotiques » et perturber massivement l'ensemble de l'économie.

-Ils ne tiennent très généralement pas compte des contraintes de ressources naturelles (par exemple risque de tension sur l'approvisionnement de l'argent métal et d'autres minerais rares) et rarement de la question climatique.

Ce dernier point est particulièrement important pour notre propos. Il est assez intuitif de se dire que la production de biens et services dépend, en plus du travail humain, de trois types

⁵⁷ Cf. *Uninsured Idiosyncratic Risk and Aggregate Saving*, S. Aiyagari, the Quarterly Journal of Economics, 1994, et *Quantitative macroeconomic models with heterogeneous agents*, P. Krusell et A.A. Smith, Econometric Society Monographs, 2006. Citons également *Debt, deleveraging, and the liquidity trap: A Fisher-Minsky-Koo approach*, G. Eggertsson et P. Krugman, The Quarterly Journal of Economics.

⁵⁸ Avec les travaux de E. Challe et X. Ragot, par exemple *Fiscal policy in a tractable liquidity-constrained economy*, X. Challe et X. Ragot, Economic Journal, 2011. Voir aussi *Quantitative macro models of wealth inequality: A survey*, Mariacristina de Nardi, voxeu.org/article/quantitative-macro-models-wealth-inequality-survey

⁵⁹ Cf. *Debt-Deflation versus the Liquidity Trap : the Dilemma of Nonconventional Monetary Policy*, G. Giraud et A. Pottier, Economic Theory, 2016 et de Gaël Giraud, *Illusion financière*, Editions de l'atelier, 2014 ainsi que la présente annexe 6.4.3.

⁶⁰ Cf. *Illusion Financière*, op. cit., et alaingrandjean.fr/2016/11/03/creation-monetaire-expliquee-economistes-de-banque-centrale-d-angleterre/

⁶¹ Cf. *A Monetary Minsky Model of the Great Moderation and the Great Recession*, op. cit. En un mot si l'excès d'endettement privé est une cause d'un problème aussi important qu'une situation de déflation, il est pour le moins anormal que cet endettement ne soit pas représenté dans un modèle macroéconomique.

de capitaux : le capital naturel (l'énergie, l'eau, les sols, la biosphère, le capital matériel (les machines) et le capital immatériel (les connaissances, les brevets, les marques). Les premiers modèles de croissance développés par les économistes (la référence en la matière étant ceux de Solow puis de Ramsey) n'intégraient comme « facteurs de production » que le travail et le capital matériel. Le capital naturel n'était pas représenté en tant que tel. On peut comprendre le souci de simplification ; mais pour certains économistes il s'agit d'une hypothèse, parfois explicitée, de substituabilité parfaite du capital naturel et du capital matériel ; hypothèse manifestement fautive dans sa généralité, même s'il peut y avoir une certaine substituabilité, comme dans le cas de l'efficacité énergétique : produire le même service énergétique avec moins de consommation énergétique mais un capital matériel plus performant.

Joseph Stiglitz⁶² a publié un modèle avec énergie dans la fonction de production en 1974. Des modèles sont depuis construits avec une fonction de production KLEM (pour capital, travail, énergie et matière). Et les modèles multisectoriels intègrent l'énergie et les matières premières. Mais les économistes néoclassiques considèrent que l'élasticité du PIB par rapport à l'énergie est égale à la part nominale de l'énergie dans le PIB (selon le théorème du cost-share). Dès lors, la critique est inévitable : cette part étant faible, il ne serait pas pertinent de faire de l'énergie un facteur de production en soi. Or ce théorème est faux et l'élasticité du PIB à la consommation de l'énergie (en volume) serait plutôt de l'ordre de 60%⁶³.

NB :

-Il existe des modèles sectoriels énergétiques (voir annexe 6.5) qui peuvent être très désagrégés (par secteurs de consommation et par sources et vecteurs d'énergie). Ils ne représentent en revanche pas les effets de rétroaction macroéconomique. Par exemple, il est bien documenté que PIB et consommation d'énergie primaire sont au moins corrélés, dans tous les pays du monde, voire « co-intégrés⁶⁴ ». Or pour les modèles énergétiques, le PIB est une variable exogène, donc indépendante de l'énergie produite et consommée. Pour représenter convenablement cette boucle de rétroaction il faut donc coupler un modèle macroéconomique et un modèle énergétique.

-Le modèle GEMMES (voir note 42) a été mis au point pour répondre aux principales critiques évoquées ci-dessus (il n'y a pas d'agent représentatif, la monnaie n'est pas neutre, le secteur bancaire et les dettes privées sont représentées, les rendements peuvent être croissants, l'énergie est un facteur de production, la rétroaction climatique est partie intégrante du modèle etc.)

-C'est aussi le cas du modèle Three-ME dont une prochaine version va comporter en outre une représentation du marché obligataire.

⁶² Cf. J.E. Stiglitz, *Growth with Exhaustible Natural Resources: Efficient and Optimal Growth Path*, Review of Economic Studies, 1974.

⁶³ Cf. G. Giraud et Z. Kahraman, *How Dependent is Growth from Primary Energy ? Output Energy Elasticity in 50 Countries*, 2014, www.parisschoolofeconomics.eu/IMG/pdf/article-pse-medde-juin2014-giraud-kahraman.pdf

⁶⁴ Idem, et cf. annexe 6.4.

3.2 La qualité des données

La mise au point et le calibrage des modèles météorologiques et climatiques bénéficient d'un ensemble de mesures de plus en plus sophistiquées depuis plus de 100 ans. La précision et la diversité des mesures permettent de tester de plus en plus finement la capacité des modèles à rendre compte des réalités. C'est particulièrement le cas des observations par satellite qui permettent une couverture globale et en quasi continu.

Notons que la diversité et la précision des observations sont particulièrement nécessaires pour les prévisions météorologiques qui dépendent très fortement des conditions initiales. Les modèles climatiques, à l'inverse, sont utilisés pour étudier un état moyen du système (distribution statistique des variables) sur de longues périodes temporelles. Ils sont beaucoup moins sensibles aux conditions initiales et peuvent donc partir d'une description grossière de l'état initial, en tout cas pour les composantes du système climatique qui varient sur des échelles de temps beaucoup plus courtes que les échelles de temps auxquelles on s'intéresse.

Les modèles économiques dépendent de données « construites socialement » et dès lors dépendantes des performances d'institutions, parfois très faibles dans certains pays. Les pays en voie de développement qui manquent de ressources humaines ont un appareil statistique parfois très insuffisant et hétérogène. Les pays à pouvoir politique « fort », peuvent produire des données statistiques discutables et discutées, du fait d'un manque de transparence de leur production et d'un doute sur l'influence du pouvoir sur ces données.

Même dans des pays démocratiques et bien organisés administrativement, les données posent de sérieux problèmes de méthode. Qu'on pense par exemple à l'inflation (au sens de hausse des prix à la consommation). Cet indicateur est construit à partir de données statistiques retraitées pour tenir compte de l'évolution qualitative des produits (passage du yaourt nature au yaourt aux fruits ?), ce qui pose de redoutables questions méthodologiques. La prise en compte du coût des logements (pour les propriétaires occupants) pose aussi de gros problèmes méthodologiques⁶⁵. On évoquera au §3.3 la question, essentielle dans les modèles de croissance, de la définition et la mesure du capital, et de sa dépréciation et, par ailleurs, celle du chômage. On peut également mentionner toute l'économie « parallèle » qui échappe aux statistiques officielles, même si des études permettent de faire des estimations et que Eurostat⁶⁶ va même jusqu'à recommander qu'elle soit intégrée dans les comptes nationaux, ce que la France a refusé de faire.

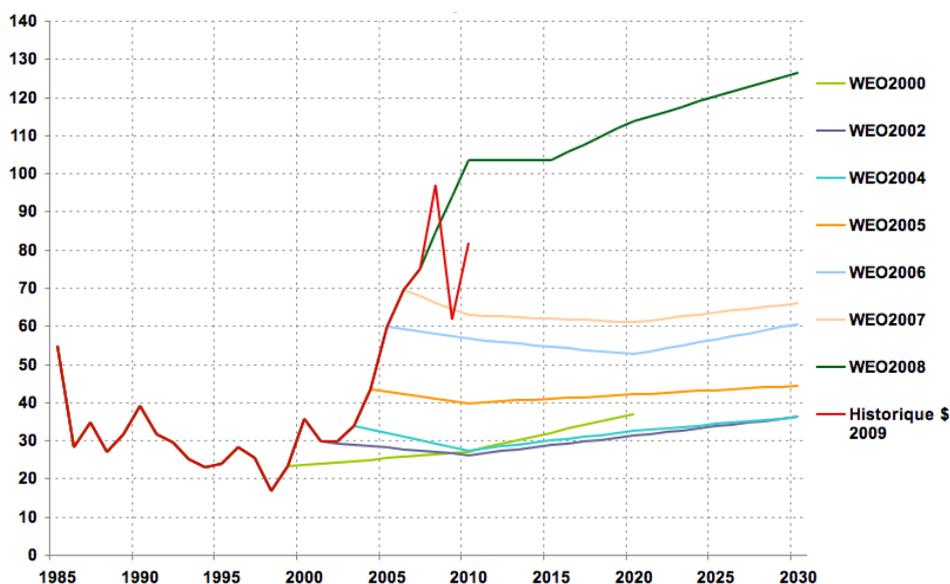
Concernant la définition du capital, ce mot est employé par les économistes dans des sens variés. Parfois, il s'agit de flux d'argent qui circulent et financent les entreprises (on parle de libre circulation du capital) ; parfois il s'agit au contraire des capitaux « physiques » (immeubles, machines etc.), que les comptables appellent des immobilisations corporelles. Mais quand on parle des revenus du capital de quoi parle-t-on ? S'il s'agit des revenus des épargnants (sous forme d'intérêts ou de plus-values obligataires) et des actionnaires d'une entreprise (sous forme de dividendes ou de plus-values de cessions), ils dépendent aussi d'actifs incorporels (les marques notamment) qui sont essentielles à la formation de ces

⁶⁵ Cf. l'entrée « Indice des prix à la consommation harmonisé » sur Wikipédia.org.

⁶⁶ www.lemonde.fr/economie/article/2014/06/18/l-insee-n-integrera-pas-le-traffic-de-drogue-et-la-prostitution-dans-le-calcul-du-pib-francais_4440160_3234.html

revenus... L'OCDE a réalisé en 2001 un épais manuel⁶⁷ (remis à jour en 2009) sur cette question dont on voit combien elle est délicate. Mais la « controverse des deux Cambridge » a montré qu'il y a une difficulté fondamentale à agréger les « biens capitaux », comme il y en a une à agréger les fonctions de production (voir §3.4 et annexe 6.4.8). Enfin, dans la pratique de modélisation macroéconomique, on bute sur un obstacle important de qualité des données accessibles, pour un problème lié à la difficulté de mesurer la dépréciation du capital. Il est souvent considéré qu'elle est constante, ce qui est certainement faux. Les comptables ne recalculent pas le capital chaque année. Ils le font sur des années de référence, puis appliquent la "méthode dite des inventaires", c'est-à-dire, appliquent l'équation $dK/dt = I - \delta K$ avec un delta constant et I, le flux d'investissement annuel qui, lui, est observé. Cette équation est deux fois fautive : d'abord le taux de dépréciation n'est pas constant dans la vraie vie ; ensuite, il y a un gap entre l'investissement et l'accroissement de capital qui est souvent supérieur à 1 an.⁶⁸

Les modèles macroéconomiques qui servent à faire des projections dépendent aussi de données d'entrée futures qui peuvent être déterminantes mais difficiles à connaître. Voici par exemple, les prévisions successives relatives au prix du pétrole faites par l'Agence Internationale de l'Énergie, dont on ne peut douter de la compétence et de l'information, dans la première décennie de ce siècle. La figure ci-dessous montre les différentes estimations faites entre 2000 et 2009. Les projections considéraient que le prix du baril atteint l'année N allait se maintenir pratiquement inchangé sur le long terme. Ces prévisions étaient manifestement fausses puisque le prix du baril a fortement augmenté sur la période. À l'inverse, la prédiction de 2008, probablement échaudée par les échecs des années précédentes, estimait que le prix du pétrole allait continuer à augmenter. Cette prédiction a, elle aussi, été contredite par l'évolution constatée.



Prix réels du baril en \$2009 et prévisions de l'AIE de 2000 à 2008. Analyse Carbone4. Source AIE

⁶⁷ Cf. <https://unstats.un.org/unsd/nationalaccount/docs/OECD-Capital-f.pdf>

⁶⁸ Remarquons que Kalecki avait fait cette remarque il y a longtemps. Cf. annexe 6.4.

3.3 La pertinence et la représentativité des indicateurs de sortie des modèles

Même si la notion un peu abstraite de température moyenne annuelle à la surface de la planète suscite quelques débats dans la communauté des climato-sceptiques, les indicateurs de sortie des modèles climatiques et météorologiques reposent sur les sciences « dures », et ne seront pas remis en cause avant longtemps. Sur un plan plus sociologique, même s'ils sont abstraits et parfois mal compris, ils sont socialement pertinents : le corps social sait ce que sont et reconnaît l'importance d'une température moyenne, de la pluviométrie et son évolution, de la fréquence des événements climatiques extrêmes etc. Inversement, des notions économiques comme le PIB, le coût d'une politique, le taux de chômage, qui peuvent sembler aller de soi dans le débat public, sont beaucoup plus discutables, au plan scientifique, comme nous allons le voir.

PIB, coût d'une politique, taux de chômage : des notions que ne vont pas de soi

1 - Le PIB

Le PIB (et sa croissance) donne une idée du développement de l'économie marchande (donc rien sur le reste, qui peut être très important, comme les activités associatives ou « domestiques »). Mais peut-on considérer que la croissance du PIB est une mesure pertinente de la santé d'un pays ? Il y a une littérature très abondante sur le sujet⁶⁹. Faire de l'impact sur la croissance du PIB le critère de « coût » d'une politique de lutte contre le changement climatique est pour le moins discutable⁷⁰. Or c'est ce que font l'immense majorité des modèles économiques « intégrés ».

Plus modestement, et c'est ce que rappelle Thomas Piketty⁷¹, le PIB devrait au moins être remplacé par le Revenu National Net⁷². Le Produit Intérieur Brut est survalorisé puisqu'il ne tient pas compte de la dépréciation du capital, et quand cette correction est faite on obtient alors le Produit Intérieur Net. Le passage du Produit au Revenu conduit à tenir compte du fait que les revenus issus de la production intérieure (en particulier les bénéfices des entreprises) peuvent partir à l'étranger (et réciproquement). C'est en termes de revenus que se pose la question des inégalités sociales.

Enfin notons que les inter-comparaisons des PIB et leur addition posent des problèmes délicats du fait de la variation des cours de change. Pour ne prendre qu'un exemple, de 2014 à 2015, selon le FMI⁷³, le PIB mondial exprimé en dollars courants a décliné de 5,7% (en

⁶⁹ Cf. *Faut-il attendre la croissance*, Florence Jany-Catrice et Dominique Meda, La documentation française, 2016, qui fait une excellente synthèse sur la question.

⁷⁰ www.lemonde.fr/planete/article/2016/12/01/les-solutions-economiques-empachent-de-prendre-a-bras-le-corps-la-defense-de-l-environnement_5041570_3244.html

⁷¹ www.liberation.fr/futurs/2009/10/06/fini-le-pib-retournons-au-revenu-national_585933

⁷² Le RNN se définit comme le produit intérieur brut (PIB) plus les revenus nets des salaires et investissements à l'étranger, moins l'amortissement du capital fixe (habitations, bâtiments, équipement, matériel de transport et infrastructure physique) par usure et obsolescence. Cf. [www.revolution-fiscale.fr/annexes-livre/TableauxGraphiques/TableauxGraphiques\(Livre\).pdf](http://www.revolution-fiscale.fr/annexes-livre/TableauxGraphiques/TableauxGraphiques(Livre).pdf)

⁷³ Cf. *Perspectives de l'économie mondiale*, octobre 2016, Tableau A1, <http://bit.ly/2qSHqPY>

passant de 78,04 à 73,7 Tr \$) alors qu'exprimé en PPA il a cru de 4,2% (passant de 109,5 à 114,1 Tr\$). Dès lors il est difficile de se faire une opinion claire et précise sur la question du contenu en énergie et de l'éventuel découplage du PIB et de la consommation d'énergie.

2 - Le coût⁷⁴ d'une politique

Il semble aller de soi qu'un raisonnement d'économiste vise à chercher des optimums « à moindre coût ». Edmond Malinvaud définit l'économie comme : "(...) *la science qui étudie comment des ressources rares sont employées pour la satisfaction des besoins des hommes vivant en société.* »⁷⁵

Or du fait que la comptabilité ne fait qu'empiler des revenus (ou des coûts, ce qui est la même chose vue de l'autre côté), du travail et du capital (rentes foncières, minières, ou profit), le coût au sens comptable n'intègre pas les destructions de ressources rares naturelles. La nature ne se fait pas payer pour les services qu'elle rend, ni pour les préjudices qu'elle subit. Le moindre coût ne peut donc être in fine que le moindre coût pour les hommes (en posant implicitement que pour un homme le travail est un coût, ce qui peut se discuter bien sûr). L'économiste, en fait, raffine, en intégrant dans sa définition du coût des éléments non marchands et définirait plutôt le coût comme une « désutilité », une insatisfaction et ferait un continuum entre dépenses monétaires (en négatif du côté des coûts) et satisfaction non monétaire (en positif). C'est pour cela que dans certains modèles (comme Dice déjà cité et plus généralement les IAM Coûts-Bénéfices), la fonction qui est optimisée c'est celle d'une fonction de bien-être social, dite utilité⁷⁶. On peut faire plusieurs remarques de fond face à ce choix.

-D'une part, la rareté principale aujourd'hui n'est pas le travail humain, qui est au contraire surabondant. Le problème social le plus important est sans doute l'inutilité⁷⁷. Ne faut-il donc pas construire des mesures de la rareté qui ne soient pas assimilables à des coûts pour les humains ? Les raretés à gérer sont clairement aujourd'hui les ressources naturelles, à commencer par les ressources biologiques et la biodiversité. Par ailleurs, la stabilité d'un climat relativement favorable aux être humains est un bien commun à gérer en tant que tel (cette stabilité est rare, et même unique ! et infiniment précieuse).

-La fonction d'utilité (utilisée dans les modèles d'équilibre général) est en général croissante avec la consommation et n'a pas d'autre déterminant ; maximiser l'utilité inter temporelle c'est maximiser la consommation mais de manière intergénérationnelle. Rien n'est dit sur les limites à cette consommation et surtout sur le poids d'autres sources de satisfaction non marchandes.

-L'agrégation des préférences des consommateurs (nécessaire pour qu'elles soient représentées par une seule fonction d'utilité) bute sur plusieurs questions de fond soulevées en particulier par Kenneth Arrow.

⁷⁴ La notion de coût pose de nombreux problèmes dans une perspective macroéconomique, que nous n'aborderons pas ici. Voir sur le blog d'Alain Grandjean : <http://bit.ly/1UoeMeC>

⁷⁵ *Leçons de théorie microéconomique*, E. Malinvaud, Dunod, quatrième édition, 1982.

⁷⁶ Le plus souvent basée sur une maximisation inter-temporelle de l'utilité inspirée du modèle de Ramsey, voir l'entrée « Modèle de Ramsey » sur Wikipédia.org et l'annexe 6.4.

⁷⁷ Cf. P.-N. Giraud *L'homme inutile*, Odile Jacob, 2015.

-Mélanger dans un même indicateur, des pertes de satisfaction et des coûts monétaires (et à l'inverse des satisfactions et des revenus monétaires) est pour le moins osé et discutable.

-Enfin il serait plus conforme à l'intuition de piloter l'optimisation économique par un ou des indicateurs tentant de représenter la « satisfaction » collective, sous contrainte première de limitation des « vraies » ressources rares et en optimisant, si possible, la quantité de travail, car il n'est quand même pas anecdotique de « préférer » toutes choses égales par ailleurs une solution avec moins de contenu en travail (donc, même si c'est au détriment de l'équilibre climatique, en poussant le raisonnement au bout !) à une solution qui augmente le chômage ! (si les gains de productivité ne peuvent être absorbés par ailleurs).

3 - Taux de chômage et taux d'emploi

Le taux de chômage est un indicateur discutable et très discuté pour trois raisons :

- on peut distinguer plusieurs catégories de chômeurs⁷⁸ ;
- il y a plusieurs mesures qui ne donnent pas les mêmes résultats⁷⁹ (des déclarations administratives de pôle emploi et des enquêtes statistiques de l'Insee) ;
- dans tous les cas, cet indicateur a une composante conventionnelle forte⁸⁰(le chômage est un « statut » pas une réalité « physique », exemple : je peux être sans emploi et ne pas être chômeur...); la part des chômeurs découragés, inscrits ou non à Pôle Emploi, très variable selon les pays, fausse également le niveau du taux de chômage. » ;

Le taux d'emploi est un peu moins mauvais :

« De nombreux économistes, et par exemple l'OCDE, estiment que le taux d'emploi est une mesure plus pertinente que le taux de chômage pour évaluer la situation du marché du travail d'un pays. En effet, le taux de chômage, même défini selon la norme internationale du BIT, peut être modifié par différentes manipulations comptables (chômeurs catégorisés à tort comme handicapés, incitation au renoncement pour les demandeurs d'emploi en fin de droits,...) et particularismes locaux (faible participation des femmes,...)⁸¹.

La France a voté en 2015 une loi (dite SAS⁸²) du nom de la députée qui l'a portée, Eva SAS, pour compléter le PIB de nouveaux indicateurs de richesse dans la définition des politiques publiques. L'ensemble forme un « tableau de bord » de la nation, plus représentatif que le seul PIB de sa santé et de ses progrès. Le CESE a travaillé sur ce tableau de bord⁸³ et en a proposé un qui incorpore des indicateurs de stock, des indicateurs écologiques et sociaux. Concernant le chômage, par exemple, il opte, à juste titre à nos yeux, pour le taux d'emploi et non pour le taux de chômage.

⁷⁸ Cf. Jacques Sapir, *Chômage : manipulation et mensonges*, Russeurope, <http://bit.ly/2qmOlhr>

⁷⁹ Cf. l'entrée « Chômage en France » sur Wikipédia.org et sa section « Catégorisation des inscrits à Pôle emploi ».

⁸⁰ La BCE vient de publier une note qui remet en cause la mesure du chômage dans la zone Euro. Selon ses experts le taux de chômage (plus précisément le « labour market slack ») serait de 18% dans la zone euro, soit presque le double du chiffre officiel fourni par Eurostat de 9,5%, ce qui expliquerait le paradoxe actuel d'une inflation ne croissant pas malgré une politique monétaire très accommodante (quantitative easing). Téléchargement sur le site de la BCE : <http://bit.ly/2q2bVBz>

⁸¹ Cf. l'entrée « Taux d'emploi » sur Wikipédia.org.

⁸² Cf. www.senat.fr/petite-loi-ameli/2014-2015/363.html

⁸³ Cf. www.lecese.fr/sites/default/files/communiqués/20151017%20CP_PIB.pdf

3.4 La validité des relations que représentent les équations mathématiques

Les modèles météorologiques et climatiques reposent d'une part sur des équations physiques dont la validité à leur échelle d'usage est prouvée depuis des décennies (comme la dynamique des fluides) et d'autre part sur des équations plus empiriques pour représenter certains phénomènes spécifiques. Ils sont développés par une communauté qui a un intérêt propre. Les modèles de climat ont évolué au cours du temps, à la fois en sophistication et en résolution spatiale, en fonction de l'avancée des connaissances, des problématiques abordées et de la puissance de calcul disponible. Il existe actuellement différents types de modèles, ayant chacun leurs avantages et inconvénients. Le choix de tel type de modèle en particulier dépendra de la question que l'on souhaite traiter. Par exemple la modélisation des calottes polaires est assez spécifique, et tous les modèles n'ont pas le même niveau de développement sur cet aspect. Du coup, les projections des modèles représentant trop superficiellement voire pas du tout la dynamique des calottes polaires ne sont pas très pertinentes sur le sujet de l'évolution du niveau de la mer... Le couplage modèle de climat-modèle dynamique de calotte fait parti des chantiers actuels des modélisateurs.

C'est pour cela que la communauté scientifique doit faire des comparaisons entre modèles⁸⁴ pour pouvoir tirer des leçons d'ordre général, et c'est aussi pour cela que ces modèles ne donnent pas tous la même réponse à une question donnée (exemple de la sensibilité climatique, où l'on teste les modèles à un doublement de la concentration préindustrielle en GES). Néanmoins le fait que ces modèles reposent largement sur des « briques » liées à des lois de la nature, validées par des expériences faites « ailleurs » et avec un très haut degré de confiance, permet de tirer des leçons solides des conclusions qu'ils donnent dans leur ensemble.

Levons ici un double malentendu. Comme l'un de nous (Gaël Giraud) l'a écrit dans la préface au livre de Steve Keen⁸⁵ « dans son manuel qui est l'une des références universitaires aux Etats-Unis (et donc dans le monde), Greg Mankiw, professeur de macro-économie à Harvard, et l'un des ténors de l'économie contemporaine explique, en effet, que les physiciens ont une marge d'erreur dans la mesure de la distance Terre-Soleil qui va de -50% à + 100%. Puisqu'une telle imprécision est tolérable dans le monde bien réglé de la mécanique céleste, suggère-t-il, rien d'alarmant si nous autres, économistes, avons quelques hésitations sur le vrai niveau d'une notion aussi difficile à cerner que le NAIRU⁸⁶, non ?

⁸⁴ Les modèles de climat font l'objet d'un ensemble de projets d'intercomparaison (CMIP), coordonnés par le Programme Mondial d'Etude du Climat (WCRP), et de confrontations à des observations actuelles et passées, ou encore des tests par rapport à leur représentation des processus. Cf. http://www.geosci-model-dev.net/special_issue590.html

⁸⁵ op. cit.

⁸⁶ Le NAIRU est littéralement le taux de chômage n'accéléralant pas l'inflation. Il s'agit en fait une théorie vivement contestée selon laquelle, toute tentative de faire tomber le taux de chômage sous le seuil du NAIRU par des politiques budgétaires et monétaires de relance serait vaine et n'aurait comme conséquence que d'augmenter le taux d'inflation sans faire diminuer le chômage. Cf. l'entrée « Taux de chômage n'accéléralant pas l'inflation » sur Wikipédia.org.

Peut-être, sauf que la distance Terre-Soleil est connue avec une précision de l'ordre de dix chiffres après la virgule (<https://fr.wikipedia.org/wiki/Terre>). Comment un professeur d'université (quelle que soit sa discipline) peut-il oser écrire une telle aberration ? »

Dans l'autre sens, l'exceptionnelle précision de certaines constantes physiques et équations⁸⁷ ne conduit pas à une précision équivalente en matière de prévision climatique et météorologique pour les différentes raisons évoquées précédemment liées aux difficultés de la modélisation. Il ne serait pas donc légitime d'oublier les incertitudes encore élevées qui restent inhérentes à ces travaux au motif que la physique est une science exacte et parfois très précise.

A l'inverse, les équations de comportement et les théories économiques utilisées dans les modèles économiques sont presque toujours discutables et toujours discutées. Prenons trois exemples (voir l'annexe 6.4 pour un développement plus complet, sans qu'il soit exhaustif).

Premier exemple, celui de la question de l'équilibre général dans l'économie et de sa stabilité. Aucun des modèles DSGE d'équilibre général n'a prévu la crise de 2008. Et ils ne le pouvaient pas. Ils ne peuvent, en effet, pas rendre compte de crash ou de crises économiques majeures, car fondamentalement ce sont des modèles d'équilibre général avec anticipations rationnelles : les agents sauraient à l'avance qu'ils agissent de sorte qu'un crash va se produire, donc ils n'agissent pas ainsi, car ce n'est pas dans leur intérêt. La seule exception imaginable (et imaginée⁸⁸) est celle où le crash est un cygne noir (hautement improbable). C'est d'ailleurs ce que retient la profession qui voit généralement dans la crise de 2008 un événement hautement improbable. Le problème est plus profond. En raisonnant par analogie avec la thermodynamique, les modèles DSGE sont des modèles dont la logique est celle de la thermodynamique au voisinage de l'équilibre⁸⁹ alors qu'on peut envisager comme en thermodynamique hors de l'équilibre⁹⁰ une économie qui peut ne pas revenir à l'équilibre, et ce pas uniquement de manière complètement exceptionnelle. Ces modèles sont critiqués⁹¹ fondamentalement parce que la théorie sous-jacente soutient que les

⁸⁷ Il est sans doute utile de rappeler que de nombreux invariants (intervenant dans des équations elles-mêmes validées avec une très haute précision) sont connus avec des précisions extraordinaires et pas qu'en mécanique classique. Qu'on songe entre autres au facteur de Landé des particules, grandeur physique sans dimension qui permet de relier le moment magnétique au moment cinétique d'un état quantique. Cf. l'entrée « Facteur de Landé » sur Wikipédia.org.

⁸⁸ Cf. A. Pottier et G. Giraud, *Krachs financiers ou trappe à liquidité Le dilemme des politiques monétaires non conventionnelles*, Revue économique, 2013.

⁸⁹ Cf. l'entrée « Lars Onsager » sur Wikipédia et la section concernant ses travaux.

⁹⁰ Cf. K. Mallick, *Systèmes hors d'équilibre : quelques résultats exacts*, thèse de doctorat, 1996, www.theses.fr/1996PA066747

⁹¹ Cf. par exemple G. Giraud, *L'économie malade de ses modèles*, (lejournal.cnrs.fr/articles/leconomie-malade-de-ses-modeles) et P. Romer, *The Trouble with Macroeconomics*, 2016 (paulromer.net/wp-content/uploads/2016/09/WP-Trouble.pdf). Le débat est animé : deux prises de position récentes d'Olivier Blanchard : *The Need for Different Classes of Macroeconomic Models* (piie.com/blogs/realtime-economic-issues-watch/need-different-classes-macroeconomic-models) et *Further Thoughts on DSGE Models* (piie.com/blogs/realtime-economic-issues-watch/further-thoughts-dsge-models) après l'article *Do DSGE Models Have a Future?* (piie.com/publications/policy-briefs/do-dsge-models-have-future) publié sous couvert de l'Institut Peterson.

marchés s'équilibrent spontanément et conduisent à des optimums. Or de nombreux arguments théoriques, y compris issus du domaine de recherche concerné, montrent que c'est faux⁹². Ces modèles DSGE ont pu asseoir l'idée de la Grande Modération⁹³ des années 1990 et 2000 où l'inflation et la croissance du PIB fluctuaient certes, mais autour d'un sentier stable : lorsqu'elles s'écartaient trop du sentier, des forces d'ajustement se mettaient en place pour les ramener à l'équilibre. Robert Lucas, alors président de l'Association des économistes américains⁹⁴, conclut en 2003 : « *Le problème central de la prévention des récessions est résolu, dans toutes ses implications pratiques, et il l'est pour de nombreuses décennies*⁹⁵. » La Grande Modération a fini par la crise de 2007-2008 et une sévère « Grande Récession » post-crise, provoquant d'énormes dégâts économiques. C'est un bon exemple illustrant le propos ci-dessus (§1.3) selon lequel les modèles issus de choix théoriques peuvent contribuer à les conforter, du moins en apparence et pendant un certain temps !

Deuxième exemple : celui du multiplicateur budgétaire⁹⁶. Il est décisif en matière de lutte contre le changement climatique dont les travaux de la New Climate Economy⁹⁷ ont montré qu'elle nécessitait des investissements privés et publics massifs. La part publique de ces investissements aura-t-elle un effet de relance de l'économie ? Si oui ces investissements sont doublement bénéfiques. Depuis Keynes, les économistes considéraient que la dépense publique était favorable à la croissance avec un effet multiplicateur chiffrable. L'économiste Robert J. Barro a remis en cause cette idée en introduisant la notion d'équivalence ricardienne. L'idée en est que financer une dépense publique aujourd'hui par emprunt serait équivalent pour les ménages à lever un impôt, car anticipant l'impôt futur ils vont épargner aujourd'hui les sommes nécessaires pour payer l'impôt demain. L'emprunt exercerait donc, comme l'impôt, un effet d'éviction sur l'investissement privé. La question s'est invitée dans le débat public quand Olivier Blanchard (alors économiste en chef du FMI) a reconnu⁹⁸, en pleine crise grecque, que les modèles du FMI sous-estimaient fortement le multiplicateur budgétaire.

Troisième exemple : bien qu'utilisées très souvent les fonctions de production (comme celles de Cobb-Douglas), font l'objet d'un débat de fond⁹⁹ car elles n'ont pas de fondement

⁹² Cf. *Illusion financière*, op. cit.

⁹³ Pour cette notion de Grande Modération, cf. *Et si la Grande Modération ne s'était jamais achevée ?* Voir sur le Blog Illusio : <http://bit.ly/2r8qR2G>.

⁹⁴ L'*American Economic Association* est la plus importante association professionnelle d'économistes américains ; elle est notamment influente pour décider des publications qui permettront à leurs auteurs d'obtenir des postes d'enseignement et une réputation.

⁹⁵ R.E. Lucas Jr. *Macroeconomic priorities*, discours à l'American Economic Association, Washington DC, 4 janvier 2003.

⁹⁶ Cf. annexe 6.4.4.

⁹⁷ Cf. newclimateeconomy.net.

⁹⁸ On se souvient de l'aveu d'Olivier Blanchard, (cf. <http://lemde.fr/1Xd26bD>) Voir annexe 6.4 et *Les erreurs de prévision de croissance et les multiplicateurs budgétaires* (blog Annotations : <http://bit.ly/2r1FrpG>)

⁹⁹ Il s'agit d'une célèbre controverse des années 1960, dite des deux Cambridge, tranchée de fait par Paul Samuelson dans un article de 1966 (en faveur du Cambridge anglais) Cf. P. Samuelson, *A Summing Up*, *Quarterly Journal of Economics*, 1966). Le débat est également tranché dans un livre récent de Felipe et McCombie *The aggregate production function and the measurement of technical*

empirique ni de justification théorique profonde. Ce sont de simples commodités de représentation, mais qui peuvent induire des biais d'analyse.

Il est important de dire ici qu'aucune théorie économique globale ne fait consensus¹⁰⁰. Dès lors, les modèles sont nécessairement «anglés», si ce n'est biaisés, et font appel à un appareil théorique qui est rarement réfutable¹⁰¹ au sens de Karl Popper¹⁰². Insistons ici sur l'idée que ceci est à la fois un défi de fond posé à la science économique (on aimerait disposer d'un corpus théorique un peu plus robuste !), une évidente limite aux leçons à tirer des modèles économiques, mais que ce n'est pas une raison suffisante pour verser dans le nihilisme ou le relativisme absolu. Quelles que soient les limites de la modélisation, dues à ce problème théorique de fond, le fait qu'elle contribue à produire un ensemble cohérent est une contribution positive à la réflexion. Mais ces limites invalident, et il faut le savoir et le dire, des propos de type « le modèle dit cela, donc c'est vrai »¹⁰³...

Les deux exemples cités plus haut (courbe de Philips et élasticité de l'épargne au revenu) sont des cas plutôt exceptionnels d'équations robustes et reconnues comme telles dans la communauté¹⁰⁴. Encore faut-il préciser que leur robustesse ne vaut pas précision au sens de la physique mais se comprend en ordre de grandeur. Citons un autre exemple proche de notre sujet : il est établi que la croissance du PIB s'accompagne d'une croissance de la consommation d'énergie avec une élasticité inférieure à un¹⁰⁵. Mais cette corrélation reste assez imprécise, et on ne peut en déduire une loi « éternelle » qui vouerait à l'avenir tout « progrès » (pour être plus général que toute croissance du PIB ou du RNN) à une consommation corrélative de la consommation d'énergie. En conclusion, les modèles économiques ne disposent pas d'un socle de lois physiques sur lequel s'appuyer solidement.

change. Not even wrong, Edward Ellgar, Cheltenham (2013), dont on trouve une synthèse dans B. Guerrien et O. Gun, *En finir, pour toujours, avec la fonction de production agrégée ?* Revue de la régulation, 2014. Steve Keen reprend cet important sujet dans *l'Imposture économique*, Editions de l'atelier, 2014. Cf. annexe 6.4.

¹⁰⁰ Pour ne pas dire plus. Les débats peuvent être vifs, au sein de la profession, comme en témoigne Steve Keen, *l'Imposture économique*, op. cit.

¹⁰¹ Une affirmation est dite réfutable s'il est possible de consigner une observation ou de mener une expérience dont le résultat entrerait en contradiction avec cette affirmation. La démarche scientifique, aux yeux de Karl Popper, c'est la critique et la recherche de l'infirmité plutôt que la défense d'une thèse. L'accumulation d'arguments en faveur d'une thèse ne résiste pas (au plan de la logique scientifique) à l'identification d'un contre-exemple ou d'une expérience qui la dément.

¹⁰² Cf. K.R. Popper, *La Logique de la découverte scientifique*, 1935, trad. fr. 1973, rééd. Payot, coll. « Bibliothèque scientifique », 1995.

¹⁰³ *La modélisation critique*, op. cit.

¹⁰⁴ Cf. l'annexe 6.4.

¹⁰⁵ Cf. *Energy and Economic Growth: The Stylized Facts*, Z. Csereklyei, M. d. Mar Rubio Varas et D. I. Stern, 2014, (PDF à télécharger ici : <http://bit.ly/2r1HKt0>) et annexe 6.4.

L'articulation micro-macro

Faut-il, et est-il possible, que les lois ou les équations macroéconomiques reposent sur un fondement microéconomique, relatif au comportement des agents individuels ? Autrement dit les lois macroéconomiques peuvent-elles et doivent-elles dériver d'équations de comportements individuels et non de relations entre variables macroéconomiques.

Le débat a longtemps fait rage chez les économistes, les modèles keynésiens des années 50 et 60 n'étant pas alors « micro-fondés ». Cette critique faite par l'école des nouveaux économistes classiques (Lucas, Sargent et Wallis) a conduit aux modèles DSGE dont la « cohérence » a semblé supérieure aux modèles précédents et qui ont été considérés longtemps par le monde académique comme les seuls crédibles. La difficulté s'est déplacée alors sur la capacité de ces modèles à rendre compte des faits empiriques, qui a été mise en cause massivement après la crise de 2008. Du point de vue défendu ici, c'est pourtant la question centrale : même si c'est en ordre de grandeur, et même si c'est sous certaines conditions (par exemple de continuité d'une politique économique) les modèles économiques sont utiles s'ils ont une capacité à rendre compte des faits.

La physique est également traversée par des débats sur les questions de réductionnisme et les phénomènes d'émergence (ou de composition). Pour ne prendre qu'un exemple : les propriétés de la molécule eau sont-elles déductibles des propriétés des atomes qui la constituent (hydrogène et oxygène) ?

La physique statistique est une grande réussite : on est arrivé à partir de lois relatives aux chocs entre particules composant un gaz à retrouver des lois relatives au comportement du gaz et à des paramètres (température, pression etc.). Mais à l'inverse les propriétés quantiques ne s'observent qu'à l'échelle microscopique... et les lois macroscopiques ne s'en déduisent pas facilement. Et les propriétés de l'eau ne s'expliquent pas facilement à partir de celles des atomes la constituant...

Dans le domaine météo et climat, les débats méthodologiques de cette nature sont circonscrits. Les lois de la physique appliquées sont connues à la bonne échelle et sont l'objet de vérifications très précises comme déjà dit. S'il y a des enjeux d'émergence et de composition, c'est d'une part autour des questions des phénomènes extrêmes et des « effets papillon », qui limitent l'horizon de prévisibilité en matière météo. Sur la question climatique de long terme la question principale est celle des effets de seuil et des irréversibilités liées par exemple au dégagement possible des hydrates de méthane en Arctique, à la fonte du pergélisol ou à l'effondrement de la calotte Ouest Antarctique.

En macroéconomie, le débat n'est pas encore tranché, au sein de la communauté dans son ensemble. Pourtant, au sein même de la tradition néoclassique, la nécessité de recourir à des variables macroéconomiques « émergentes » (non réductibles à des variables micro) est démontrée en 1975 dans une célèbre série d'articles de Hugo Sonnenschein, Rolf Mantel et Gérard Debreu¹⁰⁶, qui prouvent que la demande nette globale (somme des demandes nettes individuelles) peut avoir une forme quelconque. Il est alors impossible de déduire des comportements maximisateurs des entreprises et des ménages des conditions sur la forme

¹⁰⁶ Cf. l'entrée « Théorème de Sonnenschein » sur Wikipédia.org.

de leur fonction de demande nette globale. L'économiste Andreu Mas-Colell obtiendra plus tard le même type de résultat pour la fonction de production¹⁰⁷.

Steve Keen souligne la réalité et l'importance des phénomènes émergents. La question de l'agrégation des préférences individuelles en une fonction de préférence collective posent des problèmes théoriques (bien identifiés) et pratiques, déjà évoquées ci-dessus, et à ce jour très difficiles à résoudre¹⁰⁸.

Les modèles à la Goodwin-Keen ne sont pas microfondés et ce choix méthodologique est assumé. La macroéconomie ne peut se ramener à la microéconomie parce qu'il n'est pas possible de déduire des fonctions agrégées d'utilité, de demande et de production à partir des fonctions individuelles ; et parce qu'elle est le théâtre de phénomènes émergents.

3.5 La pertinence et la robustesse des tests

Du fait de la qualité des données, on peut tester la performance d'un modèle météorologique ou climatique. Par ailleurs les équations physiques restent stables dans le temps et connues des physiciens « tiers ». Enfin, les moyens informatiques de plus en plus puissants peuvent permettre de réduire la maille d'analyse pour mieux résoudre les processus de petite échelle et améliorer les résultats à l'échelle régionale, sans pour autant changer la structure du modèle (ex : un maillage plus fin permet de beaucoup mieux capturer les effets de relief dans les zones montagneuses).

Les modèles économiques sont beaucoup plus difficiles à tester : moins de données sont disponibles, et de moins bonne qualité. Et comme déjà dit, il y a des débats théoriques entre économistes. Les modèles de prévision conjoncturelle semblent faciles à tester : il suffit de comparer régulièrement leurs prévisions et les observations. Il n'est cependant pas si facile de trouver ce type de travaux...

La très sérieuse association FIPECO a ainsi comparé les prévisions faites par Bercy et les réalisations et les commente sobrement : « *En matière économique, la réalité observée n'est jamais conforme aux prévisions* »¹⁰⁹. Peut-on préciser ce jugement ?

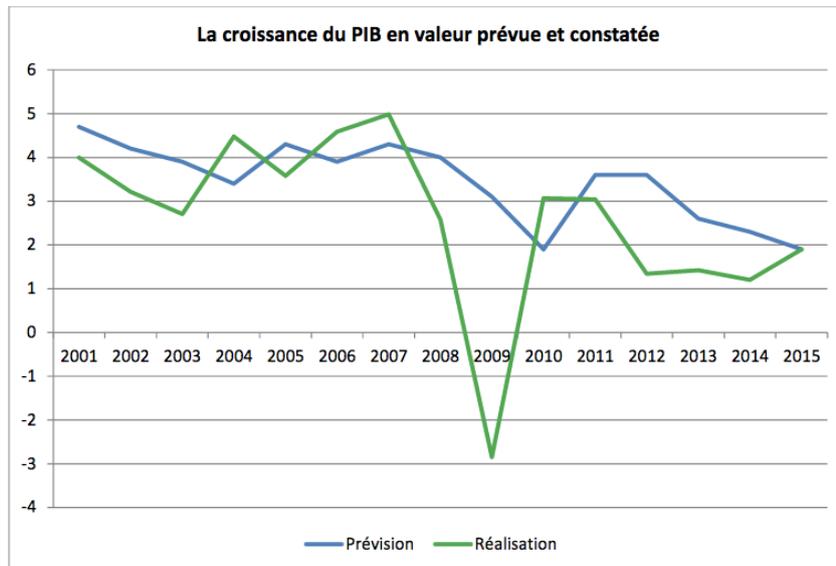
En faisant la différence entre les années N et N-1 pour le prévu et l'observé, on obtient directement une comparaison de performance de la modélisation « persistance » (qui consiste à dire que $N=N-1$) à la modélisation réelle. En effet, la différence permet de calculer l'écart à la persistance. On constate¹¹⁰ que la modélisation ne fait pas mieux statistiquement que le modèle de persistance. Le seul cas où le modèle fait significativement mieux est pour la sortie de crise de 2009. Le modèle prévoit bien qu'on revient à une croissance positive en 2010, après la forte chute de 2009. Le modèle persistance, lui, parie sur une croissance à nouveau négative et se trompe donc lourdement. A part cette année 2010, le modèle fait parfois mieux et parfois moins bien que la persistance.

¹⁰⁷ Cf. Andreu Mas-Colell, *Capital Theory Paradoxes: Anything Goes*, in Joan Robinson and Modern Economic Theory (ed. by G. R. Feiwel), New York University Press, 1989.

¹⁰⁸ cf annexe 6.4

¹⁰⁹ Citation issue du Fipeco.fr – Encyclopédie des finances publiques (<http://bit.ly/2q2XxcN>)

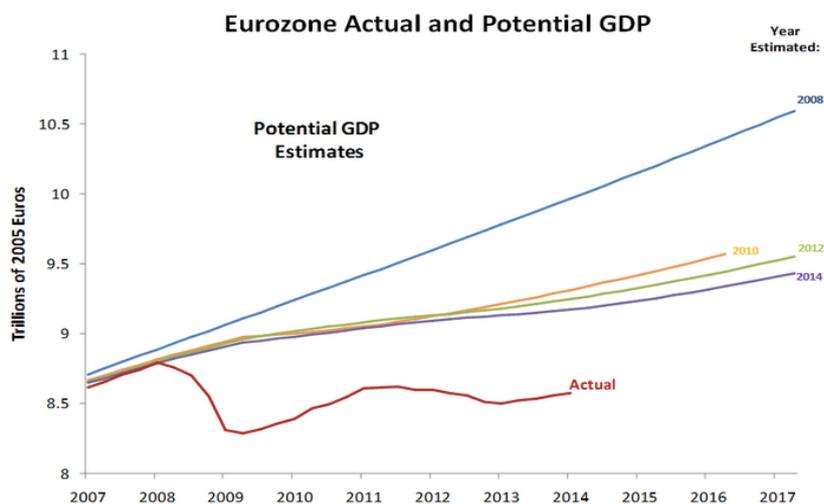
¹¹⁰ Cf. le tableau en Annexe 6.3.



Source : projet de loi de finances pour l'année considérée et derniers comptes publiés par l'Insee ; FIPECO

On peut citer ici le travail relatif à la « stagnation séculaire ». Lawrence Summers montre dans un article sur le sujet¹¹¹ à quel point les modèles des institutions les plus reconnues comme le FMI se sont trompés.

Figure 1b. Actual and potential GDP in the Eurozone



Sources: IMF World Economic Outlook Databases, Bloomberg

¹¹¹ Cf. *Reflections on the new 'Secular Stagnation hypothesis'*, Larry Summers, (octobre 2014) <http://voxeu.org/article/larry-summers-secular-stagnation>.

Il est possible et souhaitable pourtant de procéder à un test de validation assez solide, le back-testing. Comment ? En estimant et calibrant le modèle sur une période donnée passée et en comparant ensuite des projections faites sur les années suivantes (mais toujours passées) qui peuvent ensuite être comparées aux données réelles (passées, donc connues). Nous insisterons en conclusion sur ce test de validation, central, seul capable à nos yeux de s'assurer que les modèles sont robustes, et pas calibrés et recalibrés de manière ad hoc.

3.6 Le poids du calibrage et de l'estimation des paramètres

Les modèles économiques comprennent très souvent plus de paramètres que d'équations ou de données disponibles pour en déterminer la valeur de manière univoque. Dès lors se pose la question de la manière dont on les détermine.

Précisons ce point en suivant l'économiste Edward C. Prescott¹¹² et en considérant un modèle qui repose sur n variables. En gros, tôt ou tard, le modèle va se ramener à une équation affine du type :

$$x_{t+1} = A x_t + B, \text{ où}$$

x_t est le vecteur des variables, de dimension n , à la date t

A est une matrice réelle $n \times n$

B est un vecteur constant de taille n .

Pour estimer empiriquement le modèle, il faut donc trouver une valeur aux n^2 coefficients de la matrice A et aux n coefficients du vecteur B . A priori cela fait $n^2 + n = n(n+1)$ valeurs. Lorsque les éléments diagonaux de la matrice A sont nuls, il n'y a plus "que" n^2 valeurs à identifier. Or, en général, on dispose de n séries temporelles empiriques (une par variable). Donc, on a structurellement une sous-détermination des variables du modèle. Au mieux, on peut identifier n valeurs. Il en reste donc au moins $n^2 - n = n(n-1)$ qui sont indéterminées.

Dans le cas où $n = 10$ (comme c'est souvent le cas), cela fait ... 90 valeurs qu'on ne sait pas déterminer. Paul Romer en tire argument pour dire que c'est la raison pour laquelle, depuis 40 ans, beaucoup de macro-économistes inventent des modèles difficiles à réfuter et utilisant des variables inobservables, (comme la fonction d'utilité des ménages, voir annexe 6.4.6) pour fixer ces $n(n-1)$ valeurs d'une manière qui semble fondée scientifiquement mais qui est, en fait, arbitraire. On peut même ajouter que ces valeurs sont fixées de manière à garantir que les conclusions que donnera le modèle seront conformes aux attentes du modélisateur.

Andrew C. Prescott avait soulevé le problème et dit que les macro-économistes auraient à le résoudre. Paul Romer fait valoir qu'au lieu de le résoudre, les macro-économistes « mainstream » l'ont plutôt dissimulé.

Les modèles économiques sont donc, de fait, fortement dépendants du calibrage qui permet de les fixer.

¹¹² Argument que reprend Paul Romer dans *The trouble with macroeconomics*, op. cit.

La plupart des grands modèles néokeynésiens sont estimés équation par équation, à partir d'analyses économétriques du passé. Les modèles DSGE sont quant à eux souvent estimés comme des systèmes. La méthode bayésienne est alors la plus utilisée. Il s'agit de fournir des a-priori sur la moyenne et la distribution de chaque paramètre estimé. La valeur finale retenue est celle qui, compte-tenu des valeurs des autres paramètres estimés, maximise la vraisemblance du modèle par rapport aux données passées.

Cette approche n'est pas exempte de critiques, que rappelle très bien Olivier Blanchard¹¹³. La plupart des modèles DSGE, même s'ils sont de taille moins importante que les modèles néokeynésiens présentent tant de paramètres que l'estimation de tous se révèle impossible. Il est nécessaire dans ce cas d'en calibrer certains en fixant directement leur valeur plutôt qu'en l'estimant en même temps que tous les autres. Certains paramètres à calibrer peuvent être bien documentés empiriquement (ce qui ne veut pas dire qu'ils soient estimés sur des séries statistiques passées), comme la part du travail dans la valeur ajoutée dans une fonction de production. Mais pour d'autres, cette tâche est beaucoup plus difficile. Des standards dans ce cas peuvent émerger, mais sans fondement empirique robuste. Rappelons ici l'exemple déjà évoqué (§3.1) de l'élasticité du PIB par rapport à l'énergie prise égale à la part de l'énergie dans le PIB, ce qui est faux. Une autre critique encore est que les a priori des distributions et moyennes des paramètres estimés de manière bayésienne sont aussi difficiles à déterminer empiriquement. Dit autrement, les distributions à priori (l'information donnée par le statisticien avant la procédure d'estimation) sur les paramètres sont souvent comme « tirées du chapeau » et, par conséquent, peuvent aboutir à des résultats biaisés.

De ce fait, qu'un modèle économique reproduise convenablement des séries de données historiques n'est pas une preuve¹¹⁴ ni même un indice qu'il est apte à représenter la suite de ces données ni qu'il ait la moindre capacité de prévision même conditionnelle (voir § 1.3). Ceci fait parfois dire à des économistes que les modèles climatiques, étant eux aussi calibrés, « disent » ce que le modélisateur veut qu'ils « disent ».

C'est faux car la place du calibrage dans la modélisation du climat, qui est non nulle est bien inférieure à ce qui se passe en économie. D'un point de vue général, la physique ou la chimie – qui sert de base aux modèles climatologiques- n'a pas de problème systématique d'identification parce qu'elle décompose ses modèles en relations qui sont majoritairement testées expérimentalement unes à unes, indépendamment du modèle d'ensemble, et qui, une fois testées, ne sont plus remises en cause. Par exemple, personne ne réestime la constante de Boltzmann dans tous les modèles de thermodynamique où elle intervient.

Les modèles climatiques reposent cependant aussi en partie de leur calibrage, qui est inévitable. Mais cette dépendance de ces résultats au calibrage est beaucoup plus faible que pour les modèles économiques. Par exemple, la diffusion verticale de la chaleur dans l'océan est mal comprise, et relativement critique. La circulation océanique dépend en partie de cette diffusion. L'océan est chauffé par le dessus mais la couche de chaleur en surface est relativement bien mélangée sur quelques centaines de mètres d'épaisseur. Puisqu'il y a un gradient suivant les latitudes, une circulation peut se mettre en place. L'équation de diffusion de la chaleur dans les couches supérieures de l'océan requiert un paramètre, lequel n'est pas mesurable directement par expérimentation. La valeur de ce paramètre est

¹¹³ *Do DSGE Models Have a Future?* op. cit.

¹¹⁴ Ce que Robert Solow dit depuis les années 1980.

donc ajustée, dans une gamme raisonnable, afin d'obtenir des températures en accord avec les observations.

Mais au total, comme le dit Hervé le Treut (directeur de l'IPSL) :

« Contrairement à une idée souvent exprimée¹¹⁵, il n'est pas facile d'optimiser les résultats d'un modèle en jouant avec les paramètres qui servent à le définir. Par exemple, on peut détériorer gravement les précipitations neigeuses sur les régions polaires en améliorant les circulations océaniques tropicales car il s'agit d'un système composé d'une myriade de processus interdépendants. »¹¹⁶

En économie, ce qui devrait aider à réduire le gap d'identification (de taille $n(n-1)$, comme on l'a vu), ce sont :

- les contraintes de la comptabilité. C'est ce qu'on appelle, la « cohérence stock-flux », qui consiste à s'assurer qu'à tout instant, chaque stock est bien le résultat de l'historique des flux, qu'il n'y a pas disparition, ni création (sauf pour la monnaie) de quoi que ce soit.
- les contraintes de la physique et, en particulier, les deux premières lois de la thermodynamique, dont le respect n'est pas non plus toujours garanti.
- l'estimation d'un certain nombre de briques de base (l'analogie de la constante de Boltzmann) : la consommation agrégée des ménages d'un pays (en fonction des revenus, par exemple), la courbe de Phillips de court terme, etc.

3.7 La dynamique du modèle

Les modèles météorologiques reposent sur des équations non linéaires, qui conduisent à une divergence des trajectoires météorologiques et donc une impossibilité de prévoir une trajectoire (au bout de quelques jours à quelques semaines). En effet la météorologie est, elle, déterminée par les variations de l'écoulement atmosphérique au jour le jour. Ils sont en outre sensibles aux conditions initiales¹¹⁷ et à la précision de l'information qu'on leur donne en la matière.

Dès lors, leur capacité prédictive (à la précision socialement souhaitée) s'affaiblit avec le temps. Pour être plus précis, si des modèles météo se contentent de dire, à un horizon de quelques mois, que la température variera dans une région donnée à l'intérieur des fourchettes connues de variation depuis que les mesures de température sont faites correctement, il est clair que cette « prévision » n'apporte rien. En revanche leur capacité à faire une prévision même à court terme meilleures que la prévision de référence (persistance : il fait demain le même temps qu'aujourd'hui) a été testée et prouvée¹¹⁸. Les qualités des prévisions progressent : sur les 20 dernières années, on a gagné environ 2 jours de capacité de prévision, c'est-à-dire que la prévision à 7 jours a la même qualité que les

¹¹⁵ Exprimée par exemple par Henri Atlan, cf. sur sciences.blogs.liberation.fr (<http://bit.ly/2q2EEGp>).

¹¹⁶ www.climat-en-questions.fr/reponse/fonctionnement-climat/modele-climat-par-herve-treut

¹¹⁷ C'est Lorenz qui a mis en exergue cette question en popularisant l'effet papillon ; on doit à Poincaré les premiers travaux sur ces questions.

¹¹⁸ Cf. *Evaluation of ECMWF forecasts, including 2014-2015 upgrades*, op. cit.

prévisions à 5 jours qui étaient faites il y a 20 ans (Figure 2 dans la note de bas de page citée plus haut).

Les modèles climato reposent également sur des équations non linéaires, mais leur objectif est différent de celui des modèles météo. Il ne s'agit pas de prévoir avec précision le temps qu'il fera effectivement à une date donnée dans un futur plus ou moins lointain, mais d'être capable de simuler l'état moyen du climat, autrement dit la probabilité d'occurrence de tel ou tel état des variables atmosphériques. Probabilité que l'on peut déterminer en effectuant des statistiques sur les sorties multi-annuelles du modèle. Ce sont ces statistiques qui sont pas –ou beaucoup moins – sensibles aux conditions initiales. On ne peut pas dire avec certitude que le 15 Avril de 2017 sera plus chaud que le 15 Janvier de la même année, mais on peut affirmer que Avril sera plus chaud que Janvier. Le forçage du soleil, différent sur Avril et Janvier, fait qu'on peut prévoir qu'il y aura une différence sur la moyenne des températures.

Les modèles économiques sont sur le plan de l'analyse de la dynamique très différents les uns des autres. Or il est facile de comprendre l'importance de l'enjeu : les modèles peuvent-ils rendre compte de la manifeste instabilité de l'économie¹¹⁹ et de ces cycles, ou au contraire doivent-ils recourir à des chocs exogènes pour ce faire ? Ceci revient à dire, qu'alors ils n'ont pas de pouvoir explicatif de cette instabilité et probablement peu de capacité prédictive (même conditionnelle).

Le modèle historique de Solow est dynamique mais, dans la pratique, est utilisé pour caractériser son état de convergence de très long terme (l'état stationnaire). Cette pratique n'est évidemment pas scientifique car il faudrait d'abord démontrer que nous avons de bonnes raisons de penser que l'économie réelle a déjà atteint l'état stationnaire de Solow. Or rien à ce jour ne démontre que nous avons atteint la "fin de l'histoire macro-économique"...

Les modèles CGE calculent un équilibre statique pour l'année (ou le trimestre) n , puis un autre équilibre statique pour l'année (ou le trimestre) $n+1$. Parfois, le passage de n à $n+1$ nécessite l'introduction d'un choc exogène. La faiblesse de cette approche, c'est qu'elle confond la cinématique avec une succession d'équilibres. Or n'importe qui ayant appris à faire du vélo sait que, pour rouler, il ne faut surtout pas essayer de se tenir d'abord à un équilibre statique puis tenter de passer à un autre équilibre statique. La vraie dynamique passe par des processus qui ne sont pas une succession d'équilibres.

Dans les modèles DSGE, l'économie est supposée avoir déjà atteint l'état stationnaire de très long terme (comme dans la plupart des interprétations de Solow) et elle en est déviée par des chocs aléatoires exogènes. Selon le modèle, ces chocs peuvent affecter la productivité du travail ou les goûts des ménages ou la politique monétaire, etc. Les modèles DSGE sont alors construits de telle sorte que, quelle que soit la nature du choc, l'économie perturbée retourne toujours à l'équilibre. Toute la philosophie de l'exercice consiste à étudier de quelle manière elle y retourne. Evidemment, la faiblesse de cette approche, c'est qu'elle n'est pas capable d'expliquer comment une économie parvient à un état stationnaire (à la différence

¹¹⁹ Hyman Minsky a montré que la finance était intrinsèquement génératrice d'instabilités (qui ne résultent donc pas uniquement de chocs extra-économiques) ; voir notamment *Stabiliser une économie instable*, Ed. Les Petits Matins/Inst. Veblen, 2016.

d'un modèle de Solow) et, surtout, qu'elle est incapable de rendre compte d'une situation hors équilibre durable comme la déflation que connaît le Japon depuis 25 ans. Dans le « monde des DSGE », les déviations hors équilibre sont toujours temporaires et de courte durée (inférieure à 2-3 ans).

Les modèles de type Three-ME, ou « Goodwin-Keen » (ou "Akerlof-Stigitz") sont des modèles réellement dynamiques par construction (généralement en temps continu, et maintenant certains en temps discret) qui décrivent la cinématique d'une économie hors équilibre. Ils permettent de comprendre à quelle condition une économie peut finir par converger vers un état stationnaire (comme dans le modèle de Solow), à quelles conditions cet état est robuste aux perturbations exogènes (comme dans les modèles DSGE). Mais ils permettent aussi de comprendre pourquoi ces bonnes propriétés peuvent n'être pas vérifiées par telle économie réelle : il se peut fort bien qu'au lieu de converger vers un état stationnaire, elle cycle infiniment, ou encore qu'elle s'approche de cet état stationnaire de manière chaotique (au sens technique du terme). Il se peut aussi qu'il n'y ait pas qu'un seul état stationnaire mais plusieurs (ce que le modèle de Solow exclut absolument et ce dont les modèles DSGE ont grande peine à rendre compte).

La manière la plus simple de se représenter la situation est de penser à une bille qui roule à la surface de la lune. Il y a des collines et des cratères. Au bout d'un moment, la bille va se stabiliser quelque part (si elle ne cycle pas indéfiniment). Si elle se stabilise sur le sommet pointu d'une colline, cet équilibre ne sera pas stable : la moindre pichenette la fera tomber. Si elle se stabilise au creux d'un cratère, il est au moins localement stable. L'énergie d'activation nécessaire pour l'en déloger est significative et dépend de la géométrie du bassin versant. Et, évidemment, il peut y avoir plusieurs cratères - certains intéressants d'un point de vue social, d'autres non. Les cratères et les sommets des collines, ces sont les états stationnaires de long terme. La bille, c'est l'état de l'économie. Le modèle de Solow, par exemple, postule qu'il n'y a qu'un seul cratère et aucune colline, et que ce cratère est socialement désirable. Et, en pratique, les économistes ne l'utilisent qu'en postulant que l'économie s'est déjà stabilisée au fond du cratère. C'est le cas, par exemple, du travail de Thomas Piketty¹²⁰. Les modèles CGE postulent tantôt que l'économie est depuis toujours stabilisée au fond d'un cratère et y restera définitivement, tantôt qu'elle bondit de cratère en cratère sans expliquer comment elle transite de l'un à l'autre. Les modèles DSGE postulent, eux aussi, que l'économie est déjà stabilisée au fond d'un cratère et ne considèrent que des perturbations qui ne la font jamais sortir de son bassin versant. Les modèles du type Goodwin-Keen sont les seuls, à notre connaissance, qui décrivent un monde avec plusieurs cratères, plusieurs collines, et des billes capables d'effectuer des trajectoires hors d'un cratère. Ce point de vue économie

¹²⁰ Cf. G. Giraud, *Quelle intelligence du capital pour demain ? Une lecture du Capital au XXI^e siècle de Th. Piketty*, Revue française de socio-économie, 2014/1 (n° 13)

4 Les difficultés spécifiques des modèles économiques d'évaluation du changement climatique

Outre les points précédents qui mettent en lumière les différences entre modèles physiques et modèles économiques, l'évaluation économique des conséquences du climat pose des difficultés spécifiques. Les deux premières (le taux d'actualisation et la fonction de dommage) sont liées aux modèles IAM coûts-bénéfices. Elles sont telles qu'un économiste comme Robert S. Pindyck¹²¹ considère qu'ils sont inutiles et dangereux, en fournissant des chiffres largement illusoire. Rappelons que dans ces modèles, l'analyse fait (dite coûts-bénéfices ou coûts-avantages) consiste à peser, pour chaque action, le total des coûts attendus face au total des bénéfices escomptés (principalement la réduction des dommages engendrés par le changement climatique). On verra au §4.3 les difficultés posées par l'autre approche, dite coûts-efficacité, utilisée dans les modèles IAM E3 « process-based integrated assessment models» (cf &2.3) qui consiste à déterminer l'action la moins coûteuse permettant d'atteindre les objectifs de réduction de CO2 préalablement fixés, considérant que la détermination de cet objectif n'est pas du ressort de la science économique.

4.1 La question du taux d'actualisation

Tous les modèles économiques servant à faire des projections additionnent des flux financiers à venir et utilisent pour ce faire un taux d'actualisation. Une violente controverse¹²² a fait suite à la publication du premier rapport Stern en 2006¹²³ ; Nicholas Stern utilisait (en l'argumentant soigneusement) un taux de 1,4% par an plutôt bas (William Nordhaus le prenait à l'époque à 4,5 %) ce qui lui a été reproché au motif que cela favorisait sa démonstration (visant à montrer que le coût de l'inaction était plus élevé que le coût de l'action).

L'équation de Ramsey (1912) stipule, au sein d'un cadre d'équilibre inter temporel néo-classique que le taux d'escompte devrait être égal à la somme du taux de préférence pur pour le présent et du produit entre le taux de croissance de l'économie réelle et le taux d'aversion au risque. Quand bien même on adopterait l'équation de Ramsey, le débat n'est pas près d'être tranché concernant la valeur qu'il convient d'attribuer aux trois paramètres qui la composent¹²⁴. La "préférence pour le présent", une fois débarrassée de ses oripeaux psychologiques relève de grands choix éthiques : la vie d'un humain aujourd'hui a-t-elle intrinsèquement une valeur distincte de celle des prochaines générations ? Beaucoup d'économistes et d'éthiciens admettent aujourd'hui que le taux de préférence pure pour le présent devrait donc être nul. Les deux autres paramètres relèvent de la théorie économique. Doivent-ils être calqués sur les taux de financement de long terme observés

¹²¹ Cf. *The Use and Misuse of Models for Climate Policy*, R. S. Pindyck, 2015, www.nber.org/papers/w21097.

¹²² Cf. *Le Rapport Stern sur l'économie du changement climatique était-il une manipulation grossière de la méthodologie économique ?*, O. Godard, www.cairn.info/revue-d-economie-politique-2007-4-page-475.htm

¹²³ Cf. *The Stern Review*, op. cit.

¹²⁴ Cf. *Comment les économistes réchauffent la planète*, op. cit.

sur les marchés financiers ? Jean-François Mertens et Anna Rubinchik¹²⁵ fournissent de bonnes raisons¹²⁶, à l'intérieur du paradigme néo-classique et utilitariste¹²⁷, de normaliser le taux d'aversion au risque à 1. De sorte qu'au total, le taux d'actualisation devrait être égal au taux de croissance de l'économie réelle.

Quel que soit le raisonnement adopté, le taux de croissance anticipé joue un rôle majeur dans le calcul du taux d'escompte. En particulier, ce dernier ne devrait être positif que si l'on a de bonnes raisons de penser que la vie, demain, sera meilleure qu'aujourd'hui. L'hypothèse de la stagnation séculaire, par exemple, oblige à considérer sérieusement la possibilité d'un taux d'escompte nul ou, au moins, décroissant dans le temps¹²⁸. Allons plus loin : certains scénarios de décroissance contrainte (ceux de World3 ou de Gemmes) ou choisie invitent à envisager un taux d'escompte négatif. Enfin, la plupart des modèles économiques n'envisagent pas de déclinaison géographique du taux d'escompte alors que les travaux des climatologues montrent, au contraire, que le dérèglement climatique affectera de manière très différenciée les pays du Sud et ceux du Nord, et, à l'intérieur de chaque pays, les différentes catégories sociales. Qu'est-ce qui interdit de considérer un taux d'escompte différencié ?

Pour toutes ces raisons, nous pensons que sur les sujets de long terme comme le climat, il faut retenir des taux d'actualisation très proches de zéro et probablement nuls, voire négatifs pour certains types de population. Quoi qu'il en soit, il est essentiel dans toute simulation de faire apparaître explicitement le niveau choisi et les raisons de ce choix.

N.B. : Le taux d'actualisation utilisé par le monde financier, pour des calculs microéconomiques, doit être égal au « coût moyen pondéré du capital » (qui pondère les différentes sources de financement, dettes, fonds propres et quasi-fonds propres en fonction de leur coût). Cette vision microéconomique ne suffit malheureusement pas à trancher le débat macroéconomique car le coût observé du capital reflète en grande partie les anticipations de marchés sur l'évolution future de l'économie, lesquelles nous renvoient précisément aux questions précédentes : aversion au risque, stagnation, décroissance...

¹²⁵ *Intergenerational Equity and the Discount Rate for Cost-Benefit Analysis*, J.-F. Mertens et A. Rubinchik, *Macroeconomic Dynamics*, 2012.

¹²⁶ Une explication très claire en est donnée par Gilles Rotillon dans sa recension du livre sur le taux d'actualisation de Christian Gollier (*Pricing the Planet's Future : The Economics of Discounting in an Uncertain World*, Princeton, 2012.) Cf. <http://www.laviedesidees.fr/Peut-on-fixer-le-prix-du-futur-de.html#nb12>

¹²⁷ L'utilitarisme peut se prévaloir d'une longue tradition qui remonte au moins à Jeremy Bentham et à John Stuart Mill, et qui se résume aux yeux de beaucoup d'économistes néo-classiques (de manière réductionniste) à la maximisation de la moyenne du bien-être des individus concernés. Mertens et Dhillon, *Relative Utilitarianism*, *Econometrica*, 1999) fournissent une axiomatique ordinaire du critère normatif utilitariste.

¹²⁸ Cf Thomas Sterner, *Discounting in a world of limited growth*, *Environmental and Resource Economics* 4, 527-534, (1994) et Cédric Philibert, *Discounting the future in Discounting and discount rates in theory and practice*, David J Pannell, Steven Schilizzi, Cheltenham : Edward Elgar, 2006

4.2 Les fonctions de dommage¹²⁹

De nombreux travaux ont tenté d'estimer des « fonctions de dommage » mais les incertitudes demeurent très élevées. D'une part, les modèles climatiques comportent de nombreuses incertitudes en matière d'impacts. On sait que la planète va se réchauffer, que le niveau de la mer va augmenter, que les régimes de pluie vont changer, que des régions comme le pourtour méditerranéen vont subir plus de canicules. Mais la précision des impacts au plan physique reste faible (et bien sûr dépendantes des scénarios examinés). En outre malgré d'énormes progrès dans la modélisation climatique, la sensibilité climatique qui caractérise l'évolution de la température de l'atmosphère terrestre en réponse à un forçage radiatif donné, est toujours très incertaine. Elle est généralement exprimée comme la variation de température en °C associée à un doublement de la concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère terrestre. Plus précisément les scientifiques parlent de réponse climatique transitoire (Transient Climate Response, TCR) qui est l'augmentation de la température au moment où le doublement de la concentration de CO₂ est atteint. Et de sensibilité climatique d'équilibre (Equilibrium Climate Sensitivity, ECS) qui représente l'élévation atteinte lorsque les températures se seront totalement stabilisées, ce qui intervient plus tard. La TCR se situerait selon le dernier rapport du GIEC dans la fourchette 1°C à 2,5°C, une incertitude élevée tant les impacts sont différents en fonction de la température.

Quant à la mesure des impacts sur le PIB de la hausse des températures, elle est en soi très difficile. Elle repose en général sur une ou des fonctions de dommage très difficiles à vérifier. Les premiers travaux publiés conduisent à des chiffres faibles : une multiplication par deux des concentrations de CO₂ induit une perte de PIB de l'ordre de 1% pour DICE (Nordhaus 1993). Des travaux récents (Dietz et Stern, 2015) reprennent le modèle DICE et montrent qu'en relâchant certaines hypothèses discutables concernant la modélisation des dommages, telles que la forme fonctionnelle de la fonction dommage, les résultats changent significativement. Le niveau de réduction optimal des émissions par rapport au scénario de référence serait ainsi de 16% en 2015 et 27% en 2055 dans la version standard de DICE mais pourrait aller jusqu'à 48% en 2015 puis 100% en 2055 avec le jeu d'hypothèses le plus contrasté. Le coût social du carbone en 2015 (en dollar 2005) passe lui de \$44/tCO₂ à \$329/tCO₂. Une revue récente (janvier 2017) des résultats des différents modèles utilisés dans les travaux du groupe III du GIEC conduit à des trajectoires de prix du carbone variant à court terme entre 15 et 360 USD₂₀₀₅/tCO_{2e} en 2030, à moyen terme entre 45 et 1000 USD₂₀₀₅/tCO_{2e} en 2050 et entre 140 à 8300 USD₂₀₀₅/tCO_{2e} à horizon 2100. Les auteurs expliquent les écarts considérables entre ces évaluations¹³⁰. Afin de mieux fonder les fonctions de dommage, une littérature émergente tente enfin d'estimer, de manière économétrique, l'effet d'une hausse des températures sur les variables économiques en utilisant les disparités régionales ou temporelles¹³¹. Cette méthode semble conduire à des

¹²⁹ Les deux paragraphes qui suivent s'inspirent de très près de l'article de Marie-Laure Nauleau paru dans la revue *Variations*, <http://variances.eu/?author=32>. Nous l'en remercions.

¹³⁰ Cf. C. Guivarch et J. Rogelj, *Carbon price variations in 2°C scenarios explored*,

¹³¹ Pour une revue de littérature cf. Dell et al., *What Do We Learn from the Weather? The New Climate–Economy Literature*, *Journal of Economic Literature*, 2014.

dommages beaucoup plus élevés mais n'est pas exempte de limites, concernant notamment la reproductibilité des résultats.

Plus fondamentalement, ce travail se heurte à deux difficultés fondamentales.

Les dommages affectent des stocks et des biens publics non marchands qu'on ne peut monétariser. Le dommage lié à la déforestation excède de beaucoup la perte d'activité de la sylviculture. Les tentatives de monétarisation sont contestables. Par exemple donner une valeur monétaire au vivant, c'est laisser croire qu'il est substituable.

Deuxièmement, face à l'incertitude, il est essentiel de mieux représenter les conséquences sociales et économiques d'un scénario « catastrophique » non impossible, même si ce n'est pas le scénario « le plus probable ». Nous ne prenons pas l'avion si nous savons qu'il a 10% de chance de s'écraser, car les conséquences sont pour nous mortelles. Le même raisonnement doit s'appliquer en matière de conséquences du changement climatique, car nous n'avons qu'une planète et le changement climatique est irréversible.

4.3 Les difficultés de l'approche coûts-efficacité

Contrairement aux précédents modèles (IAM-CGE), les modèles utilisés pour cette approche s'efforcent surtout de représenter de manière explicite les liens entre les activités économiques et les émissions de Gaz à Effet de Serre. Ils contribuent notamment aux travaux synthétisés dans le chapitre 6 du rapport du GIEC « Assessing Transformation Pathways »¹³².

Les principales difficultés de ces modèles résident dans la désagrégation de l'économie et la représentation des substitutions à l'énergie et du progrès technique, désagrégation en fonctions de production sectorielles qui permet de répondre, partiellement, aux critiques pesant sur la fonction de production agrégée¹³³. Le même travail de désagrégation est nécessaire du côté de la consommation. Un exercice récent de comparaison des modèles macroéconomie-climat français conduit par France Stratégie en 2015¹³⁴ illustre bien l'impact des différents choix de modélisation : la réduction des émissions de CO2 obtenue est différente d'un modèle à l'autre, résultant davantage d'une plus grande efficacité énergétique (dans les processus de production ou en lien avec une moindre consommation d'énergie pour les ménages), ou d'une recomposition endogène du mix énergétique.

¹³² Modèle WITCH <http://www.witchmodel.org/>, modèle IMACLIM développé par le CIRED, etc.

¹³³ Cf. ci-dessus et l'annexe 6.4.8. Les différents types de capitaux physiques étant incommensurables entre eux, l'agrégation au sein d'une unique fonction de production de ces capitaux est réalisée en valeur et est donc fonction du système des prix, là où une relation physique entre les facteurs de production devrait être indépendante du système des prix. L'usage de fonction de production agrégée ne renseignerait donc en rien sur les possibilités techniques de substitution entre les facteurs de production (cf également Antonin Pottier, A. *L'économie dans l'impasse climatique : développement matériel, théorie immatérielle et utopie auto-stabilisatrice*, EHESS, CIRED, 2014).

¹³⁴ Cf. Boitier et al., *La transition énergétique vue par les modèles macroéconomiques*, PDF à télécharger : <http://bit.ly/2qZfsyf>

5 Du bon usage des modèles

Les modèles météorologiques sont faits pour répondre à une demande sociale claire et forte : la fourniture d'une information prévisionnelle, de plus en plus précise et à un horizon de plus en plus long. Ces modèles permettent d'orienter l'activité des particuliers (tourisme) mais aussi des entreprises (construction, transport) ou des agriculteurs. Ainsi, la connaissance de la circulation atmosphérique permet d'optimiser les trajectoires des avions. La prévision météorologique permet aussi d'anticiper les événements extrêmes, certes à court terme (du fait de la sensibilité aux conditions initiales, voir § 37)

Les modèles climatiques visent à répondre à d'autres demandes.

- Les demandes de diagnostic relatif au changement climatique. L'influence humaine sur le climat est établie (température globale ou régionale, recul de la banquise arctique, montée du niveau des mers). En revanche, il reste encore beaucoup à faire pour identifier les mécanismes responsables des changements dynamiques dans la circulation atmosphérique à grande échelle ou les courants marins, de la variabilité régionale et de l'occurrence des événements extrêmes.
- Les demandes d'évaluation des conséquences du changement climatique, en fonction de scénarios d'émissions de GES, mais aussi d'émission d'aérosols et de changement d'usage des terres (lesquels peuvent avoir des conséquences régionales majeures), avec une exigence accrue de finesse de la maille géographique et temporelle (du type : que sera le climat de la région de Barcelone en 2040 dans un scénario conduisant à une température moyenne de la Terre augmentée de 3°C ?) ;
- Les demandes concernant les effets des politiques d'atténuation et d'adaptation envisagées : sont-elles suffisantes par rapport aux objectifs visés ?

Les modèles économiques ne peuvent en aucun cas prétendre produire une prévision sur un horizon un peu long. Comme on l'a vu, des décisions politiques majeures ou des événements géopolitiques peuvent modifier radicalement les conditions de la vie économique d'un pays. Or il est crucial aujourd'hui de prendre les moins mauvaises décisions possible par rapport au défi colossal que représente le changement climatique. Cela concerne notamment les investissements à réaliser —qui nous engagent sur longue période— et la tarification du carbone —qui oriente ces investissements— mais aussi des décisions de la vie économique courante. On ne peut se passer d'outils de modélisation, qui peuvent servir à :

- bâtir des scénarios cohérents ;
- éclairer des décisions politiques ;
- révéler des impasses ou des contradictions dans une politique économique ;
- alerter le décideur sur un problème resté inaperçu.

A l'instar des modèles climatiques, les modèles économiques peuvent notamment être utilisés pour faire des « **projections conditionnelles** ». Si telle ou telle politique est mise en œuvre, et toutes choses égales par ailleurs, que peut-il se passer (en ordre de grandeur pour des variables macroéconomiques, sociologiques ou physiques clefs) ?

Les recommandations qui se dégagent de l'analyse précédente nous semblent être les suivantes.

1. Mettre à disposition en accès libre les modèles et toute leur documentation, à commencer par les modèles utilisés dans l'administration et les institutions nationales et internationales (FMI, OCDE, Banque Mondiale, Banques centrales, Ministères des Finances, FSB), en qualifiant les modèles en fonction des critères explicités aux points 2 et 3 ci-après.

2. Conformément à la recommandation 3 du rapport Canfin-Grandjean¹³⁵, **intégrer le climat dans les modèles macro-économiques**, de façon à assurer une meilleure cohérence entre l'analyse et la prévision de court terme et l'objectif de décarbonation de long terme. Les résultats de modèle ou les prévisions (par exemple dans les analyses des marchés de l'énergie) incompatibles avec le respect de l'impératif des 2 degrés, adopté à la COP21 doivent être signalés.

3. Les « gros » modèles visant à éclairer les enjeux de bouclage macroéconomiques – notamment ceux des institutions internationales — doivent :

- être cohérents en termes de stocks et de flux (*stock-flow consistent*) ;
- être compatibles avec les lois de la physique et notamment les deux premières lois de la thermodynamique ;
- fournir des résultats en quantités explicites (que ce soit sur la consommation d'énergie, de ressources non renouvelables, de ressources renouvelables, sur les quantités de déchets émises, dont les GES, sur l'emploi, les dettes privées et publiques, etc.) ;
- expliciter les circuits monétaires de l'économie considérée, et ne pas postuler *ex ante* que la monnaie est neutre à court ou long terme ; lorsque le secteur bancaire est formalisé, son pouvoir de création monétaire endogène doit être explicité ;
- pouvoir rendre compte des "paradoxes" contemporains qui caractérisent la macro-économie mondiale depuis presque dix ans : le multiplicateur monétaire (qui relie la quantité de monnaie banque centrale circulant sur le marché interbancaire et M1, la quantité de monnaie élémentaire circulant dans l'économie réelle) n'est pas nécessairement supérieur ou égal à 1 ; la quantité de monnaie (M1) en circulation et l'inflation ne sont pas nécessairement corrélés ; la dette publique d'un pays et son spread sur les marchés internationaux de la dette ne sont pas nécessairement corrélés ;
- subir des tests rétro-actifs de validité (*back-testings*) et les fournir explicitement à la critique ; la confrontation des données de sorties des modèles aux données observables est le premier critère de validité d'un tel type de modèle ;
- leurs concepteurs doivent limiter au maximum le recours à des variables cachées non observables (comme les fonctions d'utilité). Et ils doivent être aussi peu sensibles que possible à la calibration de leurs paramètres.
- être soumis à des tests de sensibilité à la calibration de leurs paramètres.

¹³⁵

Cf. alaingrandjean.fr/2015/06/18/rapport-canfin-grandjean-disponible/

4. Le résultat d'un modèle macroéconomique seul, sans contexte, ne peut et ne doit pas fournir un « argument d'autorité ». Nous devons abandonner l'idée que seuls les modèles acceptés par les revues d'économie les plus réputées sont pertinents pour la problématique climatique. En effet, à ce jour, il est presque impossible de publier dans le *top 10* des revues académiques comités de lecture d'autres modèles que des modèles d'équilibre, dont nous avons vu pourtant les limites (ils ne se prêtent pas au test de la *stock-flow consistency*, sont incompatibles avec la thermodynamique, négligent le plus souvent le rôle de la monnaie, *a fortiori* celui du secteur bancaire, sont très rarement soumis au moindre test empirique). Ceci n'autorise pas à éviter la nécessaire revue par les pairs mais conduit à refuser l'idée qu'un résultat issu d'une revue réputée est en soi meilleur qu'un autre issu d'une revue moins réputée ! Compte tenu de la faible pertinence des travaux publiés dans les « meilleures » revues depuis plusieurs décennies, il est vraisemblable, en effet, que nous assistions dans les années à venir à une réorganisation profonde de la hiérarchie de ces revues à mesure que la société civile augmentera son exigence de recevabilité auprès du monde académique.

5. Face à une demande forte, comme celle de l'évaluation des tarifications du carbone compatibles avec une trajectoire 2 degrés, il faut comparer les résultats fournis par des modèles différents, en ne retenant que ceux qui ont passé avec succès les tests du point précédent et en exigeant des modélisateurs qu'ils explicitent : la structure du modèle ; les scénarios climatiques qu'il utilise ; la manière dont il a été estimé/calibré et testé ; les données d'entrée.

6. Il est souhaitable de continuer à travailler et à tester des briques de raisonnement économique de base par l'intermédiaire de « petits modèles » (*toy models*) non testés globalement mais qui peuvent éclairer un mécanisme central d'un gros modèle. En revanche, un « petit modèle » ne saurait suffire à étayer un argument. La confrontation avec les données empiriques via l'estimation et la calibration du modèle est indispensable.

7. Il est illusoire au stade où en est la science économique de prétendre construire *un* modèle qui prétendrait rendre compte de tous les phénomènes à lui seul. C'est en outre probablement contre-productif : trop gros, un modèle devient une boîte noire inaccessible et non opposable à des revues critiques par des tiers, et où l'expérience montre qu'il peut être manipulé par des variables ancillaires connus des seuls ingénieurs en charge de la maintenance dudit modèle.

Il est préférable de construire une ou plusieurs architectures de modélisation qui permettent de créer des ponts et des interfaces entre modèles. En particulier il serait utile de disposer en France d'une plate-forme permettant cette mise en relation de modèles aux objectifs différents mais susceptibles de dialoguer.

8. Il faut favoriser la formation (y compris la formation continue) sur les difficultés théoriques / pratiques / déontologiques de la modélisation en macroéconomie, telles qu'évoquées très rapidement ici.

9 Le travail de recherche en modélisation doit être développé en vue d'affronter les limites bien identifiées des modèles actuels, y compris en ayant recours à des innovations de rupture, comme celles proposées notamment par le modèle GEMMES. Des moyens financiers et humains doivent être mis à disposition pour que ces travaux avancent rapidement.

6 Annexes

6.1 En quoi consistent les modèles climatiques ?

Les modèles numériques constituent l'outil unique d'estimation des évolutions climatiques futures. Leur rôle et leur nature sont cependant souvent mal compris.

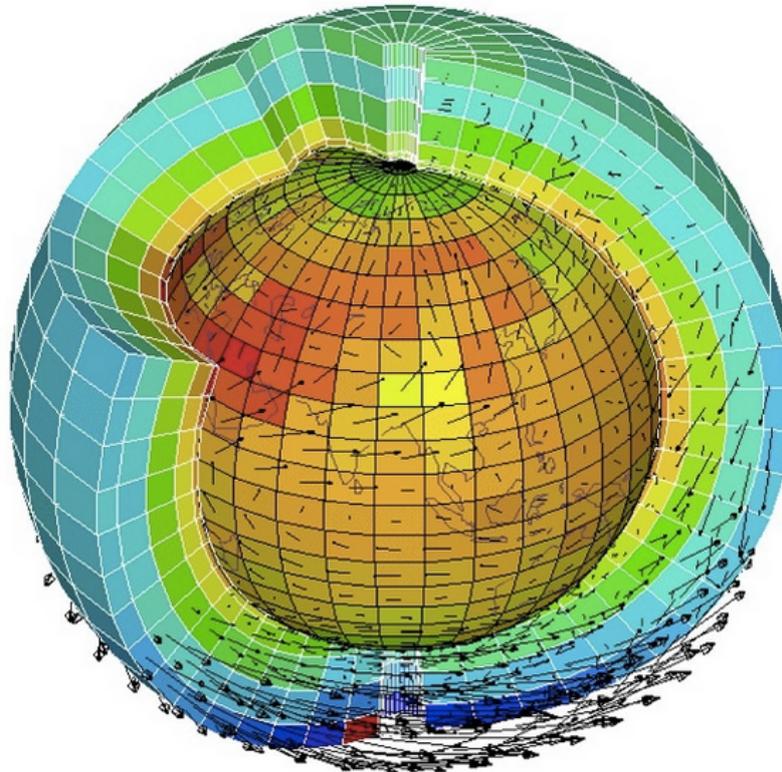
Les modèles numériques du climat utilisent les lois de la physique, de la mécanique, de la chimie ou de la biologie pour reproduire de manière informatique les processus principaux du système climatique, c'est-à-dire du système complexe composé par les fluides atmosphériques et océaniques, les glaciers ou la biosphère continentale et marine. Ces différents milieux échangent continuellement de la matière, de l'énergie ou de la quantité de mouvement au travers de processus qui mettent aussi en jeu les composantes chimiques ou biochimiques de l'atmosphère et des océans. Les échanges d'énergie se font beaucoup par rayonnement (solaire et infrarouge). Matière et rayonnement interagissent en permanence et de manière très non linéaire¹³⁶. Les modèles climatiques constituent donc une sorte de maquette informatique animée de la planète Terre. L'idée souvent répandue que les modèles de climat sont des outils statistiques extrapolant les données du passé vers le futur est donc fautive : les modèles s'appuient sur des lois physiques, et pas sur l'histoire récente du climat.

Les modèles prennent en compte deux grandes catégories de processus : les échanges d'énergie, en particulier sous forme de rayonnement électromagnétique, entre la terre, l'océan, l'atmosphère et l'espace ; et la dynamique des écoulements atmosphérique et océanique. Les équations correspondantes sont discrétisées sur les nœuds du maillage qui couvre l'ensemble du globe, c'est-à-dire qu'elles sont résolues sur chacun des milliers de points du maillage (Figure 1).

La composante atmosphérique, par exemple, calcule sur une maille d'une centaine de kilomètres l'évolution de paramètres comme le vent, la température, l'humidité, les nuages, les précipitations, l'eau du sol — pour ne citer que les variables principales. La composante océanique opère des calculs semblables sur une grille souvent plus fine. Le choix de ces grilles de résolution dépend en premier lieu de la capacité de calcul, et donc de la puissance des ordinateurs utilisés, qui constituent ainsi le premier facteur de progrès dans le domaine de la modélisation numérique. Même si les modèles reposent sur des principes physiques éprouvés depuis plusieurs décennies, la multiplication de la puissance des ordinateurs par un facteur considérable (de l'ordre du million en 15 ou 20 ans) a permis un progrès continu dans leur qualité et leur complexité et une ouverture considérable de leurs domaines d'application. La finesse du maillage dépend aussi du problème étudié. Pour une prévision météorologique à 10 jours, on peut aujourd'hui avoir une grille avec un point tous les 20 kilomètres. Pour étudier l'évolution du climat liée aux activités humaines, il faut simuler 300 ans d'histoire du climat, et les points sont espacés de 200 à 500 kilomètres pour que calcul soit possible sur les ordinateurs actuels.

¹³⁶ Un bon exemple est l'interaction entre l'eau atmosphérique et le rayonnement solaire : L'atmosphère gazeuse est pratiquement transparente au rayonnement solaire. Mais il suffit qu'une petite partie de l'eau vapeur se condense en un nuage pour qu'une fraction importante de ce même rayonnement solaire soit renvoyé dans l'espace et ne participe pas au chauffage de la Terre.

Découpage de l'atmosphère en grille



Crédits: IPSL/LMD, Laurent Fairhead.

Crédits: Olivier Marti - Laboratoire des Sciences du Climat et l'Environnement (LSCE)

Hervé Le Treut - Laboratoire des Sciences du Climat et l'Environnement (LSCE)

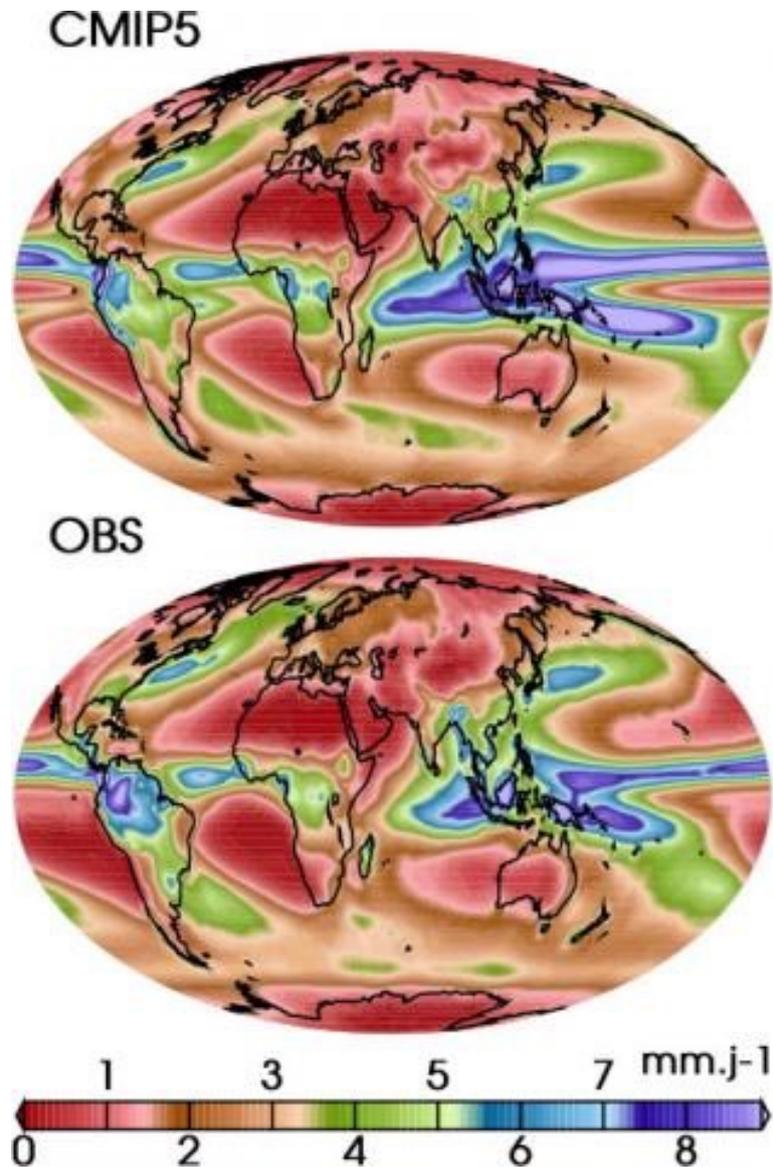
6.2 Quelles sont les méthodes d'évaluation et de validation des modèles climatiques ?¹³⁷

Les exigences sur la qualité des simulations climatiques ne cessent de croître. De nombreuses observations, tests théoriques et simulations rétrospectives permettent de vérifier si les grandes caractéristiques climatiques, ainsi que les mécanismes et processus mis en jeu, sont bien représentés.

L'évaluation de la capacité des modèles à représenter les différentes caractéristiques du climat actuel ou passé consiste à confronter les résultats d'une simulation aux différentes observations ou reconstructions disponibles. Les méthodes utilisées vont de simples comparaisons de cartes de moyenne et de variabilité (température, pluies...) à des

¹³⁷ Cf *Quelles sont les méthodes d'évaluation et de validation des modèles climatiques ?* à consulter sur le site climat-en-questions.fr (<http://bit.ly/2q5YIGw>)

estimations plus sophistiquées de l'accord modèles-données, faisant appel à des méthodes statistiques complexes. Ces méthodes plus avancées permettent de donner une mesure objective, en tenant compte notamment des incertitudes à la fois sur les observations et sur les simulations, en particulier celles liées à un échantillonnage temporel limité.



Comparaison modèles-données pour les précipitations - Source : A. Voldoire

Précipitations moyennes annuelles observées (à droite) et simulées par l'ensemble des modèles CMIP5 (à gauche) sur la période 1979-1999.

Chaque composante d'un modèle de climat (océan, atmosphère, banquise, végétation...) est d'abord validée séparément avant d'être intégrée au système complet. Cette première étape permet de juger des performances intrinsèques de chaque élément. Le système

complet, ou couplé, est ensuite évalué sur divers aspects : représentation du climat moyen (répartition des nuages, principaux vents, température...), capacité à reproduire les caractéristiques saisonnières du climat dans chaque région (aptitude à simuler les moussons tropicales, l'englacement de l'Arctique en hiver...), mais aussi capacité à simuler la variabilité interannuelle à décennale observée dans l'océan, l'atmosphère. Pour illustration, les modèles actuels sont ainsi capables de simuler et même de prévoir, jusqu'à 6 mois à l'avance, l'émergence de températures de surface de la mer anormalement chaudes dans le Pacifique, phénomène connu et observé sous le nom d'El Niño. En revanche, les modèles de climat ont en général beaucoup de difficulté à représenter de façon satisfaisante les nuages dans l'atmosphère, et en particulier les nuages bas qui ont une extension verticale faible. Or, il est bien établi maintenant que les incertitudes sur l'évolution du climat au XXI^e siècle sont principalement liées à la représentation même des processus nuageux et que l'effort doit être porté, entre autres, sur ce sujet. La communauté française a beaucoup œuvré ces dernières années pour améliorer la représentation des nuages. Par ailleurs, de nouvelles techniques de validation utilisant les données satellites, essentielles aux études climatiques, commencent à être utilisées afin d'échantillonner les caractéristiques des nuages simulés dans un modèle de manière correcte.

Les capacités des modèles à représenter les tendances récentes du climat observé (réchauffement global au XXI^e siècle de 0.74°C, hausse du niveau des mers de 17 cm) font aussi partie des critères de validation. Les simulations paléo-climatiques sont également appelées à la rescousse pour vérifier que l'on peut avoir confiance dans la capacité des modèles à reproduire les changements de climat importants déduits des enregistrements climatiques (carottes de glace, sédimentaire...) et résultant de forçages externes connus.

Les modèles français (IPSL¹³⁸ et CNRM¹³⁹-Cerfacs¹⁴⁰) qui ont participé au dernier exercice international de comparaison de simulations de climat actuels, passés et futurs (CMIP5) ont été évalués intensivement par les équipes françaises pendant environ 2 années. Ces modèles ont ensuite été examinés de façon indépendante par des équipes du monde entier qui analysent l'ensemble des simulations CMIP¹⁴¹ disponibles. Chacune de ces études se focalise sur un aspect particulier du système climatique et permet de brosser une évaluation objective et multifacette des modèles.

http://www.insu.cnrs.fr/files/plaquette_missterre.pdf : climat : modéliser pour agir et anticiper

¹³⁸ Institut Pierre-Simon Laplace (CNRS / UPMC / UPEC / Ecole Polytechnique/ CNES / IRD / ENS / Université Paris Diderot / UVSQ / CEA)

¹³⁹ Centre national de recherches météorologiques (Météo France / CNRS)

¹⁴⁰ Centre européen de recherche et de formation avancée en calcul scientifique (CNRS / CERFACS / Total SA / Safran / EDF/ EADS France SAS / CNES / Météo-France / ONERA)

¹⁴¹ CMIP5 : Coupled Model Intercomparison Project, Phase 5 : projet international proposant un protocole commun pour réaliser des simulations climatiques et mettre à disposition les résultats

6.3 Comparaison prévision du PIB /réalisation sur 2001-2015 selon données du Fipeco

Année	Vert (Obs)	Bleu (Prev)	Persistence	Prev-Obs	Persistence -Obs
2001	4	4,7			
2002	3,2	4,2	4	1	0,8
2003	2,7	3,9	3,2	1,2	0,5
2004	4,4	3,4	2,7	-1	-1,7
2005	3,6	4,3	4,4	0,7	0,8
2006	4,6	3,9	3,6	-0,7	-1
2007	5	4,3	4,6	-0,7	-0,4
2008	2,6	4	5	1,4	2,4
2009	-2,8	3,1	2,6	5,9	5,4
2010	3	1,9	-2,8	-1,1	-5,8
2011	3	3,6	3	0,6	0
2012	1,3	3,6	3	2,3	1,7
2013	1,4	2,6	1,3	1,2	-0,1
2014	1,2	2,3	1,4	1,1	0,2
2015	1,9	1,9	1,2	0	-0,7

Source : <http://www.fipeco.fr/pdf/0.48968300%201464608610.pdf>

Calculs : François-Marie Bréon

6.4 Quelques controverses en macroéconomie

La recherche de « vérités » en matière macroéconomique n'est pas nouvelle, mais elle est manifestement difficile. Et, assez curieusement pour un esprit scientifique, l'élimination des erreurs tout autant. Nous allons illustrer ce point par quelques-unes des controverses en macroéconomie, sans volonté d'exhaustivité, bien évidemment.

6.4.1 Les écoles de pensée référentes en matière de modélisation macroéconomique

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 typologie¹⁴². 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'utilité¹⁴³. Dans la version la plus élaborée, les agents sont supposés former des anticipations rationnelles (voir annexe 6.4.7). 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.

Dans cette vision la monnaie est neutre¹⁴⁴. 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 DGSE 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

¹⁴² *L'imposture économique, op.cit.* : Chap X, *Pourquoi ils n'ont pas vu venir la crise*, p 241-306.

¹⁴³ Cf. annexe 6.4.6

¹⁴⁴ 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. Voir annexe 6.4.3

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. Hicks¹⁴⁵ 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 de 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 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 endogène¹⁴⁶.

Les post-keynésiens

Représentés initialement par des auteurs comme Michal Kalecki, Joan Robinson, Nicholas Kaldor, et Piero Sraffa, essentiellement les acteurs de Cambridge UK¹⁴⁷ 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

¹⁴⁵ John Hicks: *Mr. Keynes and the 'Classics': A Suggested Interpretation*, *Econometrica*, vol. 5, 1937, p. 147-159.

¹⁴⁶ Cf. annexe 6.4.3

¹⁴⁷ Cf. annexe 6.4.8

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.

6.4.2 Retour sur les faits stylisés de la croissance

Nicholas Kaldor, afin de désigner certains faits "typiques" de l'économie, qui peuvent être significatifs sans pouvoir être chiffrés rigoureusement, emploie en 1957 l'expression de "faits stylisés". Ces derniers portent sur des grandeurs macro-économiques (des agrégats). Il repère 6 faits stylisés :

- 1) la productivité des travailleurs augmente de façon continue
- 2) le capital par tête augmente de façon continue
- 3) la rentabilité du capital est stable au cours du temps
- 4) le ratio entre le capital et la production est stable au cours du temps
- 5) le travail et le capital reçoivent chacun une part du revenu total qui est stable au cours du temps
- 6) il existe d'importantes différences de taux de croissance de la productivité et du revenu par habitant entre pays.

Il pourrait sembler aisé de savoir si ces faits en sont. Le débat en cours sur la stagnation séculaire¹⁴⁸ (relatif à la question du ralentissement de la croissance de la productivité) montre que ce n'est pas le cas du premier. Le 6 est manifestement vrai. Les 2, 3, 4 et 5 posent un vrai problème, celui de la définition et de la mesure du capital, sur lequel nous reviendrons à l'annexe 6.4.9.

En 1989, Paul Romer reprend ces faits stylisés, et en ajoute 5 nouveaux :

- 1) le taux de croissance moyen n'est pas fonction du revenu par tête
- 2) la croissance de la population est corrélée négativement avec le niveau de revenu par tête
- 3) la croissance du commerce international est positivement corrélée à celle de la production
- 4) la croissance du capital n'est pas suffisante pour expliquer la hausse de la production
- 5) les travailleurs qualifiés ou non tendent à migrer vers les économies les plus riches (là où la dotation en progrès technique et la rémunération du travail sont les plus fortes)

¹⁴⁸ Selon le terme Alvin Hansen (en 1939) repris avec beaucoup de succès dans *IMF Economic Forum: Policy Responses to Crises*, Larry Summer, IMF Fourteenth Annual Research Conference in Honor of Stanley Fischer, Washington, 2013.

Le fait 2 est statistiquement faux dans sa généralité¹⁴⁹. Les faits 3 et 5 se discutent beaucoup en ce moment, le 4 pose des problèmes déjà signalés.

Plus récemment, Charles Jones a récemment cherché (en 2015) à identifier tous les faits empiriques susceptibles d' éclairer pourquoi les populations des pays les plus riches sont plus riches qu'il y a un siècle et pourquoi certains pays sont plus riches que d'autres¹⁵⁰.

Concernant la question de la relation entre énergie et PIB, David Stern et al. identifient quelques faits stylisés¹⁵¹. Voici le résumé de leur papier :

"We summarize what we know about energy and economic growth in a set of stylized facts. We combine analysis of a panel data set of 99 countries from 1971 to 2010 with review of some longer run data. Our key result is that over the last 40 years there has been a stable cross-sectional relationship between energy use per capita and income with an elasticity less than unity of energy with respect to income. This implies that energy intensity has tended to decrease in countries that have become richer but not in others. Over the last two centuries there has been convergence in energy intensity towards the current distribution. In the long run, per capita energy use tends to rise and though evidence is limited, the cost share of energy declines."

6.4.3 Création monétaire et neutralité de la monnaie.

La question de la création monétaire a fait couler beaucoup d'encre chez les économistes. Y a-t-il vraiment création monétaire ? Si oui qui en est à l'origine et par quel processus ? Faut-il interdire à l'Etat la création de monnaie et confier à une banque centrale le monopole de la création de monnaie « centrale » et des billets de banque ? Par ailleurs, le rôle de la monnaie est aussi très débattu. Est-elle comme le prétendent les classiques un « simple voile sur les échanges » selon la célèbre formule de J.B. Say ? N'a-t-elle d'effets que sur les prix relatifs (du coup trop de monnaie aurait pour conséquences une hausse des prix) et aucun effet d'entraînement sur l'économie ?

Comme on l'a vu dans l'annexe 6.4.1 ces questions sont centrales pour distinguer les diverses « écoles d'économistes ». Ces quelques lignes ne vont pas reprendre l'ensemble des arguments du débat, ce qui nécessiterait un livre entier. Nous nous limiterons à quelques remarques essentielles.

La création de la monnaie dite scripturale (qui s'inscrit sur le compte bancaire des ménages et des entreprises) est faite par les banques secondaires (notamment mais pas exclusivement à l'occasion des prêts qu'elles concèdent). Elle est donc endogène puisque dépendant de la production de prêts qui dépend de l'activité économique. Ce processus est

¹⁴⁹ Cf. par exemple *Croissance démographique et développement économique dans les pays peu développés de 1960 à 1972* www.persee.fr/doc/pop_0032-4663_1975_num_30_6_15883 pour une étude sur la période 1960-1972.

¹⁵⁰ Cf. *Les faits de la croissance économique*, www.blog-illusio.com/2015/12/les-faits-de-la-croissance-economique.html

¹⁵¹ Cf. *Energy and Economic Growth: The Stylized Facts*, op. cit. (PDF - <http://bit.ly/2q2uhly>)

très bien compris, expliqué par les banques centrales et détaillé par le menu par exemple dans les travaux des économistes de la Banque Centrale d'Angleterre¹⁵².

Les banques centrales dans les pays de l'OCDE et l'immense majorité des pays créent la monnaie « centrale » (celle qui circule dans les échanges inter-bancaires) et les billets qui sont diffusés par les banques de second rang. Certains pays ou groupes de pays comme les pays de la zone Euro ont choisi, en l'occurrence par traité, d'interdire la création de monnaie par l'Etat et le prêt direct de la Banque Centrale à l'Etat. Ce choix repose sur des choix doctrinaux que nous qualifierons de conformes à la pensée classique, mais ne sont pas fondés scientifiquement.

Il est possible de distinguer¹⁵³ monnaie d'endettement (créée en contrepartie d'une dette) et monnaie libre (sans cette contrepartie) et il a été démontré qu'une partie significative de la dette totale (privée + publique) est liée à cette monnaie d'endettement qu'il est possible de substituer progressivement par de la monnaie libre, désendettant ainsi l'économie d'un immense fardeau déflationniste.

Quant à la neutralité de la monnaie, chère à J.B. Say, elle est infirmée par les faits. A l'évidence des excès de création monétaire peuvent soit être à l'origine de processus inflationnistes, soit les entretenir voire contribuer à les amplifier. C'est particulièrement clair dans le domaine de l'immobilier, et c'est ce que montre bien Lord Adair Turner dans son dernier livre. L'insuffisance de monnaie en circulation peu, à l'inverse, être à l'origine ou entretenir des processus déflationnistes, du fait de la destruction monétaire qui se fait quand les agents veulent se désendetter. Enfin, créer de la monnaie quand les moyens de production sont loin de la saturation peut avoir un effet d'entraînement de l'économie, tout simplement par le pouvoir d'achat généré qui stimule l'offre, qui, ne butant pas sur des contraintes de capacité peut se développer.

6.4.4 Multiplicateur de dépenses publiques et équivalence ricardienne

Au cœur du débat politique sur les dépenses publiques la question de leur impact sur la croissance est cruciale. Depuis Keynes, les économistes considéraient que la dépense publique était favorable à la croissance avec un effet multiplicateur chiffrable. L'économiste Robert J. Barro a remis en cause cette idée en introduisant la notion d'équivalence ricardienne.

De quoi s'agit-il ?¹⁵⁴

La théorie selon laquelle il y a équivalence entre dette publique et impôt a été développée par l'économiste américain Robert J. Barro dans un article intitulé «Are government bonds net wealth?» et publié en 1974. L'idée en serait que financer une dépense publique aujourd'hui par emprunt serait équivalent pour les ménages à lever un impôt, car anticipant l'impôt futur ils vont épargner aujourd'hui les sommes nécessaires pour payer l'impôt demain. L'emprunt exercerait donc une éviction sur l'investissement privé comme l'impôt.

¹⁵² Cf. A. Radia et R. Thomas, *Money creation in the modern economy*, M. McLeay, , Bank's Monetary Analysis Directorate, (PDF à télécharger sur le site de la Bank of England <http://bit.ly/1I2Bz1h>)

¹⁵³ Cf. <https://alaingrandjean.fr/2016/12/20/monnaie-libre-desendettement/>

¹⁵⁴ Cf. <https://www.fipeco.fr/pdf/0.65496900%201460121223.pdf>

L'intuition de cette théorie est attribuée à l'économiste anglais du 19^{ème} siècle David Ricardo, d'où sa désignation par l'expression « équivalence ricardienne ». Si cette équivalence était en pratique vérifiée, il n'y aurait aucun effet à attendre d'une augmentation du déficit public sur l'activité économique, mais elle repose sur des hypothèses peu réalistes et n'est pas validée de manière convaincante par les études empiriques.

Bercy dispose de deux modèles Mésange et Médée qui se distinguent sur cette question. Voici ce qu'en dit Jean-Pierre Laffargue dans un papier d'analyse¹⁵⁵.

« Le comportement de consommation des ménages, principale différence entre ces modèles, repose dans Mésange, modèle macro-économétrique keynésien, sur une fonction d'inspiration keynésienne : la consommation y est très sensible au revenu courant des ménages. Dans Egée, modèle dynamique d'équilibre général, une majorité de ménages, qualifiés de ricardiens, optimisent leurs décisions intertemporellement : leur consommation, très sensible à leurs anticipations de l'évolution future de l'économie, dépend donc peu de leur revenu courant. Si tous les ménages étaient ricardiens, Egée n'aurait pas de multiplicateur keynésien. »

La question est centrale et s'est invitée dans le débat public quand Olivier Blanchard (alors économiste en chef du FMI) a reconnu¹⁵⁶, en pleine crise grecque, que les modèles du FMI sous-estimaient fortement le multiplicateur budgétaire. « En octobre 2012, en effet, à l'occasion de son assemblée annuelle à Tokyo, le Fonds avait publié dans son "Rapport sur les perspectives de croissance mondiale" un encadré dans lequel il affirmait que la puissance des multiplicateurs utilisés pour apprécier l'impact des mesures budgétaires sur la croissance avait été sous-estimée. Le multiplicateur ne semblait pas être de 0,5 comme on le croyait avant la crise de 2008-2009, mais être compris entre 0,9 à 1,7 en raison de "la grave morosité économique, d'une politique monétaire contrainte par des taux proches de zéro et par des ajustements budgétaires synchronisés dans de nombreuses économies"¹⁵⁷.

Des travaux de recherche ont confirmé depuis que, dans les périodes de sous-emploi, le multiplicateur budgétaire pourrait être compris entre 1,5 et 2,5, c'est-à-dire qu'une réduction d'1 point de déficit public réduirait le niveau de PIB en volume de 1,5 à 2,5 points.

En France, économie ouverte (depuis 1992, avec le marché unique) le multiplicateur a toujours été estimé entre 1.2 et 1.5. C'est le cas dans MESANGE et dans Three-ME.

6.4.5 Les rendements décroissants ou constants

Les principaux résultats issus de la théorie néo-classique reposent sur l'idée que les « rendements sont décroissants ». C'est ce qui permet de justifier que la concurrence « libre et non faussée » est optimale et que les monopoles sont inefficaces. L'idée de rendement décroissant est facile à comprendre dans le monde de l'agriculture (qui inspirait la vision d'un économiste comme Ricardo) : les terres aux meilleurs rendements sont mises en culture avant les terres moins bonnes. Le rendement du capital foncier pour la production agricole est décroissant. On a la même intuition pour les mines et les gisements pétroliers :

¹⁵⁵ <http://www.insee.fr/fr/statistiques/1377575?sommaire=1377587>

¹⁵⁶ Cf. Note 98.

¹⁵⁷ Idem.

on se dit que l'exploration commence par les gisements aux meilleurs rendements... Pour autant, il y a de nombreux secteurs d'activité où les rendements sont croissants. C'est notamment le cas du digital. Quand un éditeur de logiciels a réalisé ses programmes et ses investissements commerciaux, ses revenus sont croissants avec les ventes, le coût marginal du dernier logiciel vendu étant quasiment nul. Mais c'est aussi le cas des énergies renouvelables : le soleil ne se faisant pas payer quand les panneaux solaires sont installés, le coût marginal du kWh est très faible (c'est ce qui explique le fait que sur le marché européen de l'électricité le prix de vente sur le marché de gros peut être nul). C'est bien sûr aussi le cas des infrastructures de réseau. Michel Volle¹⁵⁸ a étudié en détail les conséquences des rendements croissants dans le raisonnement économique. Dans les secteurs concernés cela doit conduire à envisager que la meilleure solution au plan économique n'est pas l'émiettement de la concurrence dite parfaite mais au contraire obéit soit au régime de monopole ou d'oligopole¹⁵⁹.

6.4.6 Les difficultés de l'usage de fonctions d'utilité

Pour un individu, la fonction d'utilité relie mathématiquement un panier de consommation à sa satisfaction (ou utilité). Un individu est supposé rationnel s'il maximise cette fonction sous contrainte budgétaire. De nombreux modèles macroéconomiques reposent sur un programme de maximisation d'une fonction d'utilité pour un agent dit représentatif supposé précisément représenter l'ensemble des agents économiques.

Ceci pose trois problèmes principaux. D'une part, que ce soit au niveau microéconomique ou macroéconomique, une fonction d'utilité n'est pas observable. Il est donc impossible d'en déterminer la forme empiriquement. D'autre part, l'hypothèse de rationalité est fortement remise en cause par tous les travaux d'économie expérimentale et de psychologie appliquée.

Enfin, comme déjà indiqué plus haut (§3.3), l'agrégation des préférences individuelles posent de redoutables problèmes, déjà identifiés par Kenneth Arrow.

6.4.7 La théorie des anticipations rationnelles

C'est l'économiste Robert Lucas qui a popularisé en 1972¹⁶⁰ le concept d'anticipations rationnelles, introduit par l'économiste John Muth en 1961, puis poussé par Thomas Sargent et Neil Wallace. L'idée est que les agents seraient capables de tirer parti de toute l'information disponible pour former leurs anticipations, de sorte qu'en moyenne stochastique, ils ne se trompent pas. Autrement dit, ils évaluent les grandeurs économiques futures à leur espérance conditionnelle aux informations connues. Cette théorie a connu un succès remarquable (elle est à l'origine des modèles DSGE), alors qu'elle est pour le moins discutable, et invalide empiriquement. La crise de 2008, ni prévue ni anticipée par les modèles fondés sur cette hypothèse a porté un coup très dur à cette hypothèse. Mais fallait-il un tel effondrement pour la discuter ? Reprenons un argument déjà avancé¹⁶¹ : « Certes les

¹⁵⁸ Cf. www.volle.com/ouvrages/e-economie/rendements.htm

¹⁵⁹ En suivant E. H. Chamberlin (1933) le terme de concurrence monopolistique est parfois employé. Il s'agit en fait d'une concurrence entre des producteurs qui cherchent à éviter à être en concurrence (via la différenciation de leurs produits) et à rester dans une situation monopolistique de fait.

¹⁶⁰ Cf. R.E. Lucas Jr., *Expectations and the Neutrality of Money*, Journal of Economic Theory, 1972.

¹⁶¹ Extrait de l'interview <http://bit.ly/2qSMZ0F>

économistes néoclassiques ne croient pas que tout le monde connaît à l'avance le degré d'enneigement à Chamonix durant la première quinzaine de février 2020. Ils sont plus subtils que cela. Ils croient que le prix de la remontée mécanique sur les pistes à cette période peut être déduit, si l'on est suffisamment malin, par exemple des obligations météo qui protègent contre le risque d'une insuffisance de neige dans les Alpes, en 2020... Folie plus soft en apparence, mais qui n'en reste pas moins de la folie. Car, dans ce monde où les prix de marché sont supposés transmettre à tout instant toute l'information pertinente, il suffit bel et bien d'observer les prix d'aujourd'hui pour en déduire l'avenir. » C'est évidemment faux, mais c'est bien ce que suppose cette théorie.

6.4.8 L'existence d'une fonction de production agrégée

En économie de l'entreprise ou microéconomie, une fonction de production relie des facteurs de production (le travail et le capital, en général) à la production de l'entreprise. Une fonction de production agrégée, en macroéconomie, relie l'ensemble des facteurs de production au PIB. La question de savoir si cette opération est « licite » ou pas a fait couler beaucoup d'encre dans la littérature.

On sait pourtant aujourd'hui que les justifications empiriques des fonctions standards (en particulier Cobb-Douglas) sont spécieuses et ne démontrent nullement que le secteur productif d'un pays correspond vraiment à de telles fonctions. Mais si l'on renonce à ces fonctions, il faut en revenir à des matrices input-output, et redonner raison aux Britanniques keynésiens dans la querelle de Cambridge de 1960¹⁶². Ce qui est difficilement envisageable pour les néo-classiques nord-américains.

Voici un extrait du papier¹⁶³ cité de Guerrien et Gun :

« Parmi les innombrables hypothèses faites par la plupart des théoriciens néoclassiques, il y en a trois qui sont un défi au bon sens tout en étant fondamentales pour eux. Il y a d'abord celle qui dit qu'en concurrence parfaite tous les agents sont preneurs de prix – ce qui suppose un système très centralisé, aux antipodes du monde que le modèle prétend décrire. Vient ensuite l'hypothèse de l'« agent représentatif » dont le choix intertemporel est censé reproduire celui de l'économie toute entière. Il y a, enfin, la fonction de production agrégée, sorte de recension des diverses techniques dont dispose une économie à un moment donné.

L'argument ultime – en fait, le seul – avancé pour justifier les hypothèses de concurrence parfaite et de l'agent représentatif est qu'elles permettent d'obtenir des résultats (théoriques) incontestables, puisque fruits de déductions mathématiques – sans que cela ne les rende pertinents pour autant. La situation est différente en ce qui concerne la fonction de production agrégée : indéfendable sur le plan théorique – elle n'a, ni ne peut avoir, de « fondement microéconomique » –, elle tirerait sa légitimité de son adéquation aux données. Le livre de Felipe et McCombie montre que cette légitimation « par les faits » est un leurre. En dépit de cette démolition en règle, les fonctions de production agrégées continuent, et vont sans doute continuer, à peupler les manuels ainsi que les travaux théoriques et appliqués. En fait, depuis belle lurette la question de l'agrégation des biens et des fonctions

¹⁶² Cf. note 99 et P.-N. Giraud, *Principes d'économie*, La découverte, 2016, page 384 et <http://www.gaelgiraud.net/wp-content/uploads/2013/11/ConcoursBLDossier6.pdf>

¹⁶³ Cité plus haut, note 99.

n'est plus à l'ordre du jour. Elle a pratiquement disparu dans l'enseignement. Une bonne partie de la profession semble considérer, comme Piketty, qu'elle a été réglée – notamment par Solow. Il n'en est rien, évidemment. Deux raisons peuvent expliquer une telle attitude de la part de ceux qui ne cessent pourtant d'affirmer leur attachement à la « rigueur » dans leurs analyses. L'une est d'ordre idéologique. Il est réconfortant de pouvoir affirmer que le problème (délicat) de la répartition du revenu est résolu de façon simple – et efficace pour la société – par la rétribution de chacun selon sa productivité marginale, pourvu que les marchés soient « concurrentiels ». L'autre est d'ordre pratique : l'« industrie » qui s'est construite autour de la fonction de production agrégée est tellement importante que la remettre en cause serait catastrophique pour ceux qui vivent d'elle, tout en la faisant prospérer. »

6.4.9 L'équation d'accumulation du capital : la variation du capital = investissement - dépréciation (constante)*capital.

Cette équation est fautive en toute rigueur car la dépréciation n'a aucune raison d'être toujours et partout constante. Mais comme elle est utilisée pour construire les séries sur le capital, elle est devenue quasiment une équation comptable¹⁶⁴. Les statisticiens ne réévaluent pas chaque année le stock de capital mondial mais le calculent à partir de cette hypothèse (fautive). Les modélisateurs ne peuvent qu'utiliser les bases de données existantes et s'appuient donc sur ces données. Du coup il est difficile de comprendre sur quelles données reposent les travaux statistiques approfondis sur le capital et les relations supposées valides par Kaldor entre capital et la production, tout comme il est difficile de comprendre comment on peut évaluer la rentabilité du capital sur longue période.

6.5 Les modèles énergétiques

Ces modèles représentent l'offre d'énergie ou un équilibre (partiel) offre-demande, et leur évolution. Ils sont généralement très désagrégés et incorporent de nombreuses données technico-économiques. Les prix des énergies sont soit exogènes soit calculés par le modèle. En revanche, ces modèles ne sont pas macroéconomiques (c'est pour cela qu'on parle d'équilibre partiel) et ne contiennent pas de boucle de rétroaction avec les autres secteurs d'activité et le PIB. Ils contiennent souvent des fonctions d'optimisation et permettent de proposer des chroniques d'investissement et des choix de politique énergétique, tout comme des coûts associés aux dites politiques. Ils servent à éclairer les décisions de politique en la matière (quels sont les investissements à privilégier ? Les mesures à prendre pour les privilégier ? A quel niveau faut-il porter une taxe carbone pour limiter à tel niveau les émissions de GES ? etc.

On peut citer Poles¹⁶⁵ (créé par le LEPII (Laboratoire d'Economie de la Production et de l'Intégration Internationale) et détenu par Enerdata), LEAP¹⁶⁶ (développé par le Stockholm Institute), Primes¹⁶⁷ (développé par le E³M-Lab de l'Université polytechnique nationale d'Athènes et utilisé par la Commission européenne), Markal-Times utilisé par l'AIE.

¹⁶⁴ Cf. *Quelle Intelligence pour le capital au XXIe siècle ?*, op. cit.

¹⁶⁵ Cf. l'entrée "Prospective Outlook on Long-term Energy Systems" sur Wikipédia.org.

¹⁶⁶ www.energycommunity.org/default.asp?action=introduction

¹⁶⁷ Cf. l'entrée "PRIMES" sur Wikipédia.org.