

ÉTAT DE LA MACROÉCONOMIE ENVIRONNEMENTALE APPLIQUÉE

Gissela Landa Rivera, Paul Malliet, Aurélien Saussay

OFCE, Sciences Po Paris

Frédéric Reynès

NEO (Netherlands Economic Observatory), TNO (Netherlands Organisation for Applied Scientific Research) et OFCE Paris

Pour une large part, la macroéconomie environnementale se développe à l'écart des débats théoriques qui agitent les autres champs d'étude de la macroéconomie appliquée. En témoigne la faible représentation des questions environnementales dans les revues d'économie généralistes ou dans les manuels de macroéconomie avancée. Si l'environnement n'est jusqu'ici pas considéré comme un thème à même de faire progresser la connaissance en macroéconomie, il est depuis les années 1990 au moins un sujet important d'application des modèles macroéconomiques. En particulier, ces derniers sont utilisés pour analyser et quantifier les effets économiques de la transition vers un système de production et de consommation soutenable. Nous proposons d'apporter un éclairage sur l'état de l'art en macroéconomie environnementale appliquée. Plus particulièrement, nous nous attacherons à identifier les spécificités de cette thématique de recherche, qui expliquent les choix théoriques et empiriques qui y sont pratiqués.

Mots clés : macroéconomie environnementale, modélisation macroéconomique, IAM, CGE.

Il convient tout d'abord de souligner que dans la grande majorité des cas, la macroéconomie environnementale est avant tout une macroéconomie *climatique*. Les autres grandes thématiques de l'économie de l'environnement – limitation des externalités négatives, gestion des communs, exploitations des ressources renouvelables et non-renouvelables – relèvent d'autres branches de la discipline économique, telle que la microéconomie, l'économie

expérimentale ou comportementale. À l'inverse, la question climatique est une problématique largement macroéconomique. La réduction des émissions de gaz à effets de serre est une condition *sine qua non* pour limiter le changement climatique et donc les risques associés pour l'environnement et les écosystèmes (IPCC, 2014). Cela suppose une modification en profondeur des comportements de production et de consommation d'énergie qui concerne l'ensemble de l'économie. De la même façon, les conséquences du changement climatique, qui commencent à se manifester à travers l'accroissement des phénomènes météorologiques extrêmes et une hausse continue des températures moyennes observées, induisent une modification profonde et brutale des équilibres écosystémiques dont dépend l'ensemble des activités économiques humaines.

L'étude des aspects économiques du changement climatique requiert donc de pouvoir prendre en compte l'ensemble de ces dimensions. Les modèles pertinents s'inscrivent dans l'aide à la formulation et à l'évaluation de politiques publiques visant à réduire les émissions de gaz à effets de serre, responsables du changement climatique. Ces politiques – prix du carbone, plafond d'émission global ou sectoriel, normes ou autre intervention réglementaire – nécessitent un certain degré de pilotage par la puissance publique. Ce besoin impose l'emploi de modèles macroéconomiques appliqués, à même de reproduire en simulation des dynamiques économiques réalistes.

L'utilité première des modèles produits par la macroéconomie environnementale est d'abord de fournir une aide à la décision publique et une évaluation continue des transformations nécessaires à l'atteinte des objectifs environnementaux que se donne la société. Ce rôle leur impose nécessairement une approche appliquée. En ce sens, leur intention est assez comparable à celle des modèles DSGE (*Dynamic Stochastic General Equilibrium*) dans l'élaboration de la politique monétaire. Ces derniers sont utilisés quotidiennement au sein des banques centrales pour aider à répondre à des questions concrètes de pilotage macroéconomique. Les modèles macroéconomiques environnementaux ont vocation à jouer un rôle comparable dans la lutte contre le changement climatique. Leur tâche semble cependant plus ardue que pour les DSGE qui font pourtant l'objet d'intenses débats quant à la nature de

l'outil, à son réel pouvoir explicatif ou sa complémentarité avec d'autres outils¹. Les modèles macroéconomiques environnementaux font face à des défis similaires mais à un degré plus élevé de complexité. Comme nous le verrons, cela provient de l'absence de consensus concernant le cadre théorique du modèle, de la nécessité de prendre en compte l'hétérogénéité des agents, d'incorporer des techniques de modélisation empruntées à d'autres disciplines (physique, ingénierie, climatologie) mais aussi de la diversité et de la complexité des politiques économiques à prendre en considération.

Cet article dresse le portrait des principales caractéristiques des modèles macroéconomiques contemporains traitant de la question climatique et apporte un éclairage sur les controverses qui les entourent. Nous passons notamment en revue les modèles existants afin d'en présenter les principales caractéristiques, autant en termes de structure que d'objet d'étude. Nous proposons enfin un certain nombre d'améliorations, tant dans les approches de modélisation que dans les méthodes de dissémination, qui permettraient de dépasser certaines critiques.

1. Les modèles d'évaluation intégrée (IAM)

Comme le souligne et le regrette Katheline Schubert (voir son article dans ce même numéro), la problématique du changement climatique, et plus généralement de l'utilisation croissante des ressources naturelles, sont largement laissées de côté par les recherches avancées en macroéconomie qui privilégient souvent la cohérence analytique au détriment des recherches appliquées. En témoigne la faible représentation des questions environnementales dans les revues d'économie généralistes ou dans les manuels de macroéconomie avancée. Ainsi, les travaux récents s'inscrivant dans la synthèse néokeynésienne *via* les modèles DSGE traitent peu de ces questions préférant se focaliser sur des problématiques de court terme. Et si les modèles néoclassiques de croissance intègrent régulièrement des composantes environnementales, ces dernières n'affectent pas les déterminants structurels de la croissance, contrairement à l'éducation, aux infrastructures publiques, à la

1. Voir notamment les échanges vigoureux récents autour de l'article de Christiano *et al.* (2017).

technologie ou aux institutions. Si l'environnement n'est pas considéré comme un thème à même de faire progresser la connaissance en macroéconomie, c'est toutefois un sujet pour lequel existe une forte demande sociale et pour lequel la science économique s'avère pertinente pour mettre en évidence les arbitrages existants en déterminant les coûts et bénéfices à considérer². Il est d'ailleurs, depuis les années 1990, l'objet de nombreuses applications des modèles macroéconomiques. En particulier, ces derniers sont utilisés pour analyser et quantifier les effets économiques de la transition vers un système de production et de consommation soutenable. Deux classes principales de modèles macroéconomiques sont utilisées : les modèles d'évaluation intégrée (*Integrated Assessment Models, IAM*) et les modèles d'équilibre général calculable (CGE), qui seront traités dans la prochaine section.

Parmi les IAM, on peut citer les modèles PAGE (Hope, 2006), FUND (Waldhoff *et al.*, 2014) ou la suite de modèles développée dans le cadre de l'initiative « IIASA Integrated Assessment Modeling Framework »³. Mais c'est le modèle DICE développé par Nordhaus (1991, 2013) qui reste encore aujourd'hui la figure de proue de cette classe de modèles. Alors que les IAM peuvent se révéler d'une grande complexité du fait de l'interdépendance de nombreux modules économiques et techniques, le succès de DICE provient sans doute en grande partie de sa transparence et de sa relative simplicité. DICE est composé d'un module climatique et d'un module macroéconomique. Le premier représente la relation entre la hausse de la concentration des émissions de gaz à effets de serre (mesurées en équivalent CO₂) et la hausse de la température globale dans le temps. Le deuxième traduit cette hausse de température en termes de dommages économiques (*via* une fonction dite « de dommages »). Le module macroéconomique détermine aussi le lien entre l'activité économique et les émissions ainsi que le coût associé à leur réduction (*via* une fonction d'abattement). Supposant qu'un agent économique représentatif maximise son utilité inter-temporelle sous l'hypothèse d'anticipations parfaites, DICE détermine de manière endogène le coût social du carbone mesuré par une taxe carbone « optimale ». Cette dernière est définie par

2. Voir à ce sujet l'article « Acid Rain » (Newbery *et al.*, 1990)

3. Voir <http://www.iiasa.ac.at/web/home/research/researchPrograms/Energy/IAMF.en.html>.

l'arbitrage entre les bénéfices de court terme et les coûts à long terme de la croissance économique sur le bien-être. Si la version standard de DICE est déterministe, les recherches récentes développent des IAM stochastiques pour tenir compte de l'incertitude entourant les paramètres-clés du modèle⁴. La relative simplicité et la transparence du modèle DICE ne lui permettent cependant pas de se soustraire à la critique virulente de Pindyck (2017) à l'encontre des IAM : « In a recent article, I argued that integrated assessment models (IAMs) 'have crucial flaws that make them close to useless as tools for policy analysis'. In fact, I would argue that calling these models 'close to useless' is generous: IAM-based analyses of climate policy create a perception of knowledge and precision that is illusory, and can fool policy-makers into thinking that the forecasts the models generate have some kind of scientific legitimacy. IAMs can be misleading – and are inappropriate – as guides for policy, and yet they have been used by the government to estimate the social cost of carbon (SCC) and evaluate tax and abatement policies ». Pindyck (2017) reproche aux IAM la calibration arbitraire de certains de leurs paramètres pourtant cruciaux pour les propriétés et les résultats du modèle. Il s'agit notamment du taux d'actualisation, de la fonction de dommage et de la sensibilité climatique (le lien entre température et concentration de gaz à effets de serre)⁵.

Ce problème de calibration est une critique généralisable à la quasi-totalité des modèles économiques utilisés dans différents domaines. Mais au-delà de cette critique, Pindyck reproche surtout aux développeurs et utilisateurs d'IAM leur manque d'humilité et d'honnêteté scientifique concernant les limitations de leur modèle, en souhaitant feindre l'expertise pour dissimuler leur ignorance derrière des abstractions mathématiques. Une autre critique sous-jacente est le caractère largement normatif du principal sujet d'application des IAM, à savoir l'estimation endogène du coût social du carbone. Or la détermination du coût social du carbone dépasse largement le champ de l'économie car il traduit

4. Voir par exemple les applications et la revue de littérature de Hwang *et al.* (2013, 2017).

5. En particulier, la publication du Rapport Stern (2006) a suscité un large débat sur la question même du taux d'actualisation mais également sur la prise en compte de l'incertitude, notamment celle relative à l'occurrence de phénomènes extrêmes. Voir à ce sujet Beckerman et Hepburn (2007), Nordhaus (2007), Weitzman (2007, 2009) et Dasgupta (2007, 2008).

fondamentalement notre degré d'altruisme vis-à-vis des générations futures et fait donc plus appel à l'éthique morale qu'à un simple calcul d'optimisation inter-temporelle. La manière dont cette question est traduite en termes économiques dans les IAM oblige à des simplifications contestables. Si elle offre une abstraction utile, la maximisation d'une utilité inter-temporelle sous l'hypothèse d'un taux d'actualisation ne capture pas toute la complexité de nos arbitrages avec le bien-être des générations futures. Elle ne traduit qu'une manière possible (parmi de nombreuses autres) de résoudre le conflit de répartition entre les générations présentes et futures que pose la problématique du changement climatique.

Pour dépasser cette limite, Pindyck ébauche une approche plus positive pour déterminer le coût social du carbone. Il s'agit, dans un premier temps, de définir une trajectoire d'émissions compatible avec un résultat souhaité. Pindyck propose comme critère l'évitement des conséquences catastrophiques du changement climatique. On pourrait en imaginer d'autres comme léguer aux générations futures l'environnement dans un certain état de conservation. Dans un deuxième temps, il s'agit de déduire le coût économique associé à un d'un tel objectif. L'économiste n'a plus la prétention de définir de manière optimale la trajectoire des émissions qui devrait être avant tout le fruit d'un choix souverain (préférentiellement *via* un processus démocratique), et être reconnu comme tel. Cette trajectoire est donc une contrainte à respecter qui doit être définie en dehors du modèle, sur la base de diverses expertises scientifiques mais aussi d'un compromis politique et social. Si les IAM ne permettent pas de définir une telle trajectoire, ils ont néanmoins permis d'intéresser les décideurs politiques et d'apporter des éclairages à la question climatique, comme le montrent par exemple les travaux de la Commission Quinet (2008) sur la valeur tutélaire du carbone en France ou ceux du groupe de travail sur le coût social du carbone (2016) rattaché à la présidence des États-Unis.

2. Les modèles d'équilibre général calculable (CGE)

Les modèles d'équilibre général calculable (CGE) constituent la deuxième classe de modèles macroéconomiques appliqués à l'environnement. Il s'agit de modèles de taille souvent relativement grande car ayant une représentation sectorielle calibrée sur des données *Input-Output* de la comptabilité nationale. À la différence des IAM, ces modèles n'intègrent pas de comportement d'optimisation inter-temporelle. Ils ne cherchent pas à dériver les trajectoires optimales de la taxe carbone et des émissions. Par contre, la trajectoire des émissions est souvent une cible exogène définie hors modèle. La taxe carbone et d'autres instruments de politique économique sont utilisés pour atteindre cette cible et le modèle permet de mesurer les impacts économiques associés. Pour certains scénarios, les CGE cherchent à tenir compte de politiques favorisant l'acceptabilité sociale (e.g. redistribution d'une partie des recettes de la taxe carbone vers les ménages les plus pauvres) mais aussi d'éventuelles contraintes techniques ou temporelles liées à la réduction des émissions. Les CGE reposent donc sur une approche plus positive que les IAM. Ils cherchent davantage à comprendre et à quantifier les conséquences de certains choix de politiques économiques qu'à déterminer les politiques environnementales économiquement optimales. Leur spécification est le fruit d'un arbitrage entre complexité, cohérence interne et externe, et la possibilité de répondre aux questions posées. Cela fait qu'ils sont souvent critiqués pour leur manque de transparence. Il y a essentiellement trois raisons à cela.

La première découle de l'absence de consensus concernant les fondements théoriques du modèle. Bien que des subtilités existent, on peut subdiviser la littérature en deux classes de CGE. D'un côté, les CGE néo-classiques qui supposent que la parfaite flexibilité des prix et des quantités assure à tout moment le plein emploi des facteurs de production. Parmi ces modèles, on peut citer (de manière non exhaustive) les modèles multi-pays de l'OCDE ENV-Linkages (Chateau *et al.*, 2014) GTAP (Center for Global Trade Analysis – GTAP, 2014), GEM-E3 (Capros *et al.*, 2013), IMACLIM (Crassous *et al.*, 2006 ; Sassi *et al.*, 2010) ou le modèle multirégional RHOMOLO (Brandsma *et al.*, 2015).

D'autres modèles retiennent des hypothèses d'inspiration néo-keynésienne en introduisant des frictions : les ajustements des

prix, du capital et du travail sont supposés lents du fait des rigidités et des coûts d'ajustement observés empiriquement. Parmi les CGE d'inspiration néo-keynésienne appliqués aux questions environnementales, on peut citer les modèles macro-économétriques E3ME (Cambridge Econometrics, 2014), GINFORS (Lutz *et al.*, 2010) ou NEMESIS (ERASME, n.d.)⁶. Ces derniers estiment les élasticités et les délais d'ajustements des principales équations de comportement. Le modèle ThreeME développé par l'OFCE en collaboration avec l'ADEME est aussi un CGE d'inspiration néo-keynésienne⁷. Notons que la classification de certains CGE n'est pas évidente à réaliser car certains modèles combinent des hypothèses néo-classiques et néo-keynésiennes. Par exemple, FIDELIO (Kratena *et al.*, 2013) retient des ajustements lents sur la consommation alors qu'ils sont instantanés pour la formation des prix et les demandes de facteurs.

Cette coexistence de modèles appliqués aux fondements théoriques divergents est une source de confusion, voire de défiance, notamment pour les décideurs politiques auxquels les résultats de ces modèles sont destinés. Les choix théoriques sont importants puisque cela conditionne les résultats obtenus. Le désaccord entre modèles sur l'existence ou non d'un double dividende (économique et environnemental) lié aux politiques de lutte contre le changement climatique est caractéristique à cet égard. Des différences substantielles peuvent apparaître selon les modèles au niveau des ordres de grandeur, du signe des effets et des mécanismes économiques sous-jacents. Alors que les CGE néo-classiques concluent souvent à des impacts macroéconomiques négatifs en raison d'effets d'éviction, les modèles d'inspiration néo-keynésienne mettent en avant l'existence d'effets multiplicateurs de l'investissement public dans la transition énergétique qui débouchent sur des dynamiques économiques favorables. L'existence d'un double dividende dans un modèle néo-classique résulte ainsi généralement d'un impact positif sur l'offre (amélioration de

6. Les auteurs des modèles E3ME ou GINFORS définissent leur modèle macro-économétrique en opposition aux modèles CGE. Toutefois, d'un point de vue technique, la différence entre les CGE standard et les modèles macro-économétriques relève de la procédure de calibration utilisée et des règles de bouclages retenues. Nous considérons pour cette raison que les modèles macro-économétriques font partie de la classe des modèles CGE.

7. Voir Callonnec *et al.* (2013 a, 2013 b, 2016) ou Landa Rivera *et al.* (2016). ThreeME est calibré de manière à reproduire les dynamiques de court-terme estimées économétriquement.

la compétitivité ou hausse de l'offre de travail), quand les modèles d'inspiration néo-keynésienne mettront aussi en avant les mécanismes d'entraînement *via* la demande (hausse de la consommation et de l'investissement).

Le choix d'un cadre d'analyse néo-keynésien semble préférable car il repose sur des hypothèses plus réalistes que le cadre néoclassique. La prise en compte de frictions permet d'ailleurs de tenir compte des phénomènes qui intéressent particulièrement les décideurs politiques comme les effets d'une politique sur le chômage (involontaire) ou l'inflation. Pour autant, les CGE environnementaux d'inspiration néo-keynésienne n'intègrent pas certaines spécificités des modèles macroéconomiques néo-keynésiens les plus avancées que sont les DSGE. En particulier, les anticipations sont supposées adaptatives (*backward-looking*) plutôt que rationnelles (*forward-looking*). Ce choix est guidé par le besoin de conserver une certaine simplicité de résolution du modèle alors que l'hypothèse d'optimisation inter-temporelle en information parfaite des DSGE n'a pas fait la preuve de sa robustesse empirique. Les CGE environnementaux privilégient ainsi la cohérence et la maniabilité du modèle afin de pouvoir tenir compte d'éléments spécifiques à la problématique du changement climatique.

La critique du manque de transparence provient aussi du fait que les CGE sont souvent des modèles de grande taille. Du fait de leur désagrégation sectorielle détaillée, ils comportent de nombreux paramètres définis à l'échelle sectorielle, comme les élasticités de substitution entre facteurs de production notamment, dont la calibration est généralement peu documentée. La constitution de la base de données de calibration nécessite souvent d'amender les données brutes en mettant en œuvre une série d'hypothèses laissées à la discrétion du modélisateur. Ces dernières sont pourtant cruciales pour les propriétés du modèle. Par exemple, la désagrégation d'un secteur comme l'électricité en plusieurs sous-secteurs nécessitent de ventiler la production mais aussi les différents facteurs de production entre les sous-secteurs. Les données permettant de réaliser ce travail correctement ne sont pas toujours disponibles. Lorsque le modèle est multi-pays, il est nécessaire de mettre en cohérence les données de comptabilité nationale et celles de commerce international. Ce travail, déjà difficile au simple niveau macroéconomique agrégé, peut se révéler

d'une grande complexité lorsque l'on veut tenir compte de la composante sectorielle. Sous l'impulsion de projets tels que GTAP (www.gtap.agecon.purdue.edu), EXIOBASE (www.exiobase.eu), WIOT (www.wiod.org), de grands progrès ont été accomplis dans la construction de bases de données *Input-Output* (IO) internationales et multisectorielles. En plus de mettre en cohérence les données économiques nationales et d'échanges commerciaux, ces bases fournissent des extensions environnementales (émissions de CO₂ ou usage de différentes ressources naturelles) très utiles pour la construction de CGE appliqués à l'environnement. La clarté de ces ressources reste toutefois à améliorer – en particulier, les étapes de la construction de ces bases de données ne sont généralement pas accessibles. Elles reposent sur le croisement de différentes sources statistiques parfois contradictoires que des algorithmes plus ou moins complexes mettent en cohérence.

La troisième raison contribuant à la critique du manque de transparence des CGE environnementaux provient du fait que ces derniers sont parfois couplés avec des modèles *bottom-up* technico-économique. Cette approche est connue sous le nom d'hybridation⁸. Si les modalités de couplage sont variées et peuvent être plus ou moins intégrées dans un ensemble cohérent, elles visent toutes à donner une représentation plus riche de la réalité dans ses différentes dimensions, en intégrant notamment des contraintes techniques et sociologiques spécifiques à certains secteurs d'activités ou catégories de ménages. Ces contraintes étant insuffisamment prises en compte par les outils analytiques standard utilisés en sciences économiques (fonction de production ou d'utilité), leur prise en compte est nécessaire si l'on souhaite proposer une politique adaptée qui inclue cette complexité dans son analyse.

Par exemple, dans un CGE standard, le ménage représentatif maximise une fonction d'utilité sous contrainte de revenu. Selon la valeur supposée de l'élasticité de substitution, la consommation de chaque bien suit de manière plus ou moins proportionnelle l'évolution du revenu. Cette représentation a l'avantage d'être relativement simple mais peut se révéler problématique pour la

8. Pour une vue d'ensemble de cette méthode, voir le numéro spécial dirigé par Hourcade *et al.* (2006) dans *Energy Journal*.

consommation d'énergie. Comme formalisé théoriquement par Lancaster (1966a, 1966b) et appliqué dans certains modèles hybrides (Laitner et Hanson, 2006), les ménages ne consomment pas l'énergie pour son utilité directe, mais plutôt pour le service qu'elle fournit lorsque sa consommation est combinée à l'utilisation de biens d'équipement, comme une voiture ou un logement. En effet, il est inutile d'acheter de l'essence si l'on ne possède pas de véhicule. Une représentation théorique plus réaliste consiste à supposer que l'énergie est un « input » utilisé en combinaison avec différents types de capitaux dans la fonction de production des ménages. Cela représente le fait que certains services sont produits directement (plutôt qu'achetés) par les ménages, comme les transports, par exemple. Les ménages peuvent acheter directement ce service au secteur des transports publics. Alternativement, ils peuvent investir en capital *via* l'achat d'un véhicule et acheter la quantité d'essence nécessaire pour combler leurs besoins en mobilité. C'est par exemple l'hypothèse retenue dans la version hybride de ThreeME (voir Callonnec *et al.*, 2013, 2016). Cette représentation a plusieurs avantages. La consommation d'énergie n'est plus reliée mécaniquement au revenu mais au stock de logements et de biens d'équipement. L'utilisation des équipements (et donc la consommation d'énergie) peut s'accroître avec le revenu mais il est possible d'imposer des seuils de saturation sur la base de critères physiques. La hausse du prix de l'énergie n'entraîne plus la hausse de la consommation de tous les autres biens mais seulement des biens d'équipement moins intensifs en énergie.

Si l'objectif de l'hybridation est louable, cette approche présente plusieurs inconvénients. Elle augmente la complexité du modèle, d'autant plus que le CGE sera hybridé avec plusieurs modules *bottom up*. Elle est une source potentielle d'instabilité car elle introduit des non-linéarités ou des phénomènes de seuils qui perturbent les algorithmes de résolution. Enfin, les résultats reposent aussi sur la calibration de certains paramètres qu'il est parfois difficile de fonder de manière empirique, comme la sensibilité des choix d'investissement au prix de l'énergie dans l'exemple fourni ci-dessus.

3. Vers une plus grande transparence et maniabilité des modèles

Les modèles macroéconomiques environnementaux appliqués ont pour ambition de servir d'outils d'aide à la décision politique. Il est donc primordial qu'ils réussissent à générer suffisamment de confiance afin de pouvoir s'affranchir de la critique de la transparence. Une première approche, souvent proposée, serait de viser la simplification en s'inspirant de la pratique dominante en économie environnementale théorique, qui s'appuie sur des modèles épurés afin d'en dériver analytiquement les propriétés. C'est la démarche adoptée par le modèle DICE. Par sa petite taille et son accès libre (« open source »), ses résultats sont faciles à répliquer. Mais est-il vraiment souhaitable de transposer les contraintes de la modélisation théorique à l'économie appliquée ?

Les hypothèses simplificatrices retenues dans les modèles théoriques permettent généralement d'obtenir une résolution analytique. Cette résolution présente l'avantage de démontrer sans ambiguïté les mécanismes à l'œuvre et de confirmer ou d'infirmer certaines intuitions ou raisonnements économiques de manière indiscutable. Mais ces hypothèses ne sont pas sans coût : en particulier, leur adoption relève parfois pour le modélisateur d'un choix « technique », facilitant la dérivation de solutions de forme fermée, sans que celle-ci soit nécessairement motivée par la réalité économique modélisée. La domination en économie environnementale des approches néoclassiques en est une bonne illustration : certaines hypothèses (optimisation inter-temporelle avec information parfaite, ou pleine utilisation des facteurs de production notamment) continuent à constituer la fondation de nombreux modèles, alors même qu'elles ont été rejetées empiriquement.

Si l'utilisation de modèles épurés à des fins appliquées permet une approche plus analytique que numérique de l'analyse des politiques environnementales, elle peut aussi aboutir à des conclusions contestables. L'échec empirique des modèles « Real Business Cycle » (RBC), qui supposent que le chômage est toujours volontaire et reflète l'arbitrage inter-temporel entre le travail et le loisir, est un exemple typique des possibles dérives liées à l'utilisation de modèles trop simplifiés à des fins appliquées.

Comme nous l'avons vu plus haut, Pindyck reproche aux IAM (et au modèle DICE en particulier) d'utiliser le formalisme mathématique pour bénéficier des attraits de la rigueur scientifique alors que dans les faits ces modèles reposent sur des hypothèses souvent irréalistes. Ainsi si les modélisations de la fonction de dommage ou du rôle du taux d'actualisation dans DICE sont analytiquement simples, elles n'ont pas de fondements empiriques solides. Par ailleurs, les recherches récentes réalisées sur le modèle DICE et d'autres IAM sont essentiellement théoriques (introduction de l'incertitude dans le modèle, analyse des propriétés sur la base d'une forme réduite). Elles tentent rarement de rendre le modèle plus réaliste. Pindyck en tire la conclusion sévère que les IAM sont d'une utilité quasi-nulle pour les décideurs politiques.

Dans une démarche appliquée, le réalisme des hypothèses du modèle est crucial et ceci d'autant plus que les résultats sont destinés à appuyer des décisions politiques. La question de la macroéconomie environnementale nécessite d'avoir une représentation relativement fidèle de la complexité des phénomènes en jeu. Il est important de pouvoir intégrer un ensemble large de dimensions comme l'évolution des technologies, les échecs de marché, la structure de production, l'hétérogénéité entre pays ou dans les comportements de consommation, les divergences d'intérêt ou encore les caractéristiques économiques des infrastructures existantes comme l'irréversibilité des investissements. Certaines dimensions relevant de disciplines – physique, ingénierie, climatologie – extérieure à l'économie, un dialogue est souvent nécessaire entre les modèles macroéconomiques environnementaux et leurs contreparties dans les sciences « dures » sur la base d'objets communs – flux d'énergie et de matières en unité physique ou stocks de capitaux consommateurs d'énergie, dont les bâtiments, les véhicules ou les équipements de production industrielle notamment. Il est aussi important de pouvoir tenir compte des différentes politiques d'accompagnement car les questions climatiques sont des questions essentiellement multisectorielles qui génèrent des inégalités. Elles requièrent des politiques de compensation ou de déclinaison des dispositifs à des échelles fines. Autant de points pour lesquels une représentation *réaliste* est nécessaire si l'on souhaite proposer une analyse pertinente.

Éclairer la décision publique sur la transition énergétique nécessite de représenter explicitement l'hétérogénéité économique et environnementale des différents secteurs de production. À l'aide d'une segmentation sectorielle des activités économiques, Howitt (2006) décrit comment l'utilisation d'un agent représentatif dans les principaux modèles macroéconomiques constitue un sophisme de composition (*fallacy of composition*), ce qui limite leur pouvoir explicatif. Colander *et al.* (2008) font un constat similaire concernant les modèles appliqués d'aide à la décision. Selon eux, il est important de dépasser cette représentation synthétique du comportement des agents en y introduisant de l'hétérogénéité⁹. Colander *et al.* (2008) proposent également d'adopter une approche non-paramétrique plus proche des sciences de l'ingénieur, en adoptant une position agnostique quant aux fondements théoriques du modèle.

Si la structure multisectorielle des CGE reflète déjà une certaine hétérogénéité par les données, l'introduction de comportements différenciés pour certains types d'agents s'inscrit selon nous dans cette démarche. Ce processus d'hybridation vise justement à spécifier les comportements propres à l'usage d'énergie en les fondant sur des modèles généralement d'ingénierie technique propre à certaines activités économiques, comme celle de la structure des réseaux énergétiques par exemple. Cette combinaison à la fois d'une recherche de micro-fondations des comportements-clés, et d'une confrontation constante aux données empiriques conduisent à une plus grande complexité des modèles, mais elle semble être la voie la plus à même d'éclairer les décideurs publics. Aux modélisateurs la charge de limiter cette complexité à son essence même, sans se soustraire à l'impératif d'appréhension la plus fidèle possible du réel afin de pouvoir en rendre la compréhension et la lecture la plus aisée possible.

Pour paraphraser une citation attribuée à Albert Einstein, les modèles devraient être les plus simples possibles, mais pas plus. Il

9. À noter que les modèles DSGE sont actuellement au cœur d'un débat économique quant à leur (in)capacité à prévoir les crises financières. Dans un récent article, Christiano *et al.* (2017) défendent les DSGE en arguant du fait que si ces critiques pouvaient s'appliquer aux modèles pré-crise 2008, les développements récents, notamment sur la prise en compte de frictions et par l'introduction d'hétérogénéité dans les comportements des agents leurs permettent désormais de représenter des phénomènes de non-linéarité propre à l'apparition de crises de manière fidèle et réaliste. Une synthèse de ces débats proposée par l'institut Bruegel est consultable ici : <http://bruegel.org/2017/12/the-dsge-model-quarrel-again/>

faut s'accommoder du fait que les modèles macroéconomiques environnementaux appliqués nécessitent un minimum de complexité. Faute de quoi, ils perdent leur réalisme et ne peuvent pas prétendre devenir des outils d'aide à la décision politique. Il est évident que lorsque des simplifications sont possibles elles doivent être mise en œuvre. Mais la simplification des modèles n'est pas une fin en soi.

Les développeurs d'outils d'aide à la décision politique ont en revanche un effort important à réaliser en matière de transparence. Dans l'idéal, la modélisation économique appliquée à l'environnement devrait se conformer à un protocole standardisé facilitant la comparaison et donc une plus grande transparence des modèles. Nous abordons brièvement ci-dessous trois axes sur lesquels pourraient s'appuyer cette démarche.

Premièrement, la modélisation économique devrait se concentrer sur la mesure des effets d'une politique donnée à partir d'indicateurs économiques précis comme l'emploi, l'inflation, le PIB, le revenu, etc. En l'état des connaissances de la science économique, un modèle qui prétend calculer comme variable endogène la politique fiscale optimale ou le niveau optimal des émissions de CO₂ n'est pas crédible aux yeux des décideurs politiques. Par contre, un modèle peut aider ces derniers à déterminer les politiques économiques qui permettraient d'atteindre un objectif de réduction d'émissions donné en mesurant les effets économiques de chaque politique, en intégrant différents types d'instruments, mais également en identifiant des impacts redistributifs. Dans une optique de développement d'un outil de modélisation d'aide à la décision, l'approche adoptée par les CGE semble donc préférable à celle des IAM.

Deuxièmement, un effort doit être fait pour rationaliser la complexité des modèles, en d'autres termes les rendre plus maniables afin de rendre leurs propriétés plus transparentes. Les avancées des 25 dernières années en termes de capacité de calcul informatique ont favorisé le développement de modèles de grande taille. La tentation est grande pour le modélisateur d'intégrer dans un même modèle le plus de dimensions possibles. Un facteur « marketing » vient renforcer ce biais : l'exhaustivité apparente d'un modèle favorise souvent l'obtention de financements *via* des contrats de recherche ou de consultance. Les modèles appliqués

ont ainsi connu une augmentation importante du niveau de désagrégation selon les secteurs d'activité, les zones géographiques ou le type de consommateur. À cela s'ajoute le développement de techniques d'hybridation avec les modèles technico-économiques, qui complexifient encore la compréhension des propriétés d'un modèle. Si la complexité peut avoir l'avantage d'améliorer le réalisme d'un modèle, elle a aussi des inconvénients. Par exemple, le niveau de détail d'un modèle peut n'être que factice lorsque les données utilisées pour une désagrégation sont de mauvaise qualité et de fait, n'apporte pas d'information pertinente à l'analyse. De plus, la complexité augmente les risques d'erreur et rend souvent les résultats plus difficiles à interpréter. Il est donc important de justifier clairement le niveau de désagrégation utilisé dans un modèle en montrant ce qu'il apporte par rapport à un cadre d'analyse plus simple. Idéalement, le niveau de complexité d'un modèle appliqué devrait être modulable en fonction de la question étudiée afin de ne pas incorporer uniformément un niveau de détail superflu qui brouillerait l'analyse des résultats.

Troisièmement, il semble que l'amélioration de la transparence des modèles économiques appliqués à l'environnement passe par une meilleure collaboration entre les équipes de modélisation. À l'heure actuelle, les échanges sont généralement limités à la comparaison des approches retenues ou de résultats de simulations de scénarios communs. Faute de temps et de moyens, ces comparaisons se bornent souvent à constater les divergences plutôt que d'essayer de les résoudre. Les collaborations entre équipes de modélisation en amont de la construction des modèles sont quasiment inexistantes. On pourrait pourtant imaginer la mise en commun de certaines connaissances *via* l'utilisation de plateformes de modélisation comme cela se pratique dans d'autres disciplines (par exemple pour les modèles climatiques). Ainsi la construction et l'utilisation collaboratives de bases de données permettraient d'une part des économies d'échelle mais garantiraient surtout que les modèles reposent sur des hypothèses discutées et acceptées par différentes équipes de chercheurs. Cette approche faciliterait aussi la comparaison de résultats de scénarios basés sur des hypothèses standardisées. Idéalement, la totale transparence impliquerait la possibilité de pouvoir répliquer les résultats d'un autre modèle mais cela suppose de surmonter les problèmes de confidentialité.

Dans un premier temps, la mise en commun de blocs de modèles semble un objectif plus réaliste. À plus long terme, on peut espérer que des modèles en accès libre (« open source ») deviennent les références dans le domaine.

4. Conclusion

Cet article dresse un état des lieux des principaux modèles macroéconomiques traitant des questions environnementales. Leurs limites sont d'autant plus problématiques que ces modèles ont vocation à être de plus en plus utilisés en tant qu'outils d'aide à la décision comme en témoigne leur utilisation croissante dans la littérature dite grise (rapports d'agences gouvernementales, de *think tank* ou d'institutions supranationales). Dans le contexte de la lutte contre le changement climatique, il est important de disposer d'outils d'évaluation des politiques économiques. La transition énergétique, au-delà de son objectif initial d'opérer la décarbonation de notre économie, conduit surtout à une modification structurelle de son fonctionnement dans ses différentes dimensions. Il est donc essentiel de pouvoir anticiper les effets des changements induits pour en déterminer une trajectoire réalisable. Pour ce faire, les développeurs de modèles appliqués doivent réaliser des progrès importants en termes de transparence. Nous avons ébauché une stratégie possible qui y contribuerait. Il nous apparaît d'autant plus urgent de mettre en place une telle stratégie que les questions posées à la macroéconomie environnementale appliquée ne cessent de s'élargir, pour inclure aujourd'hui l'analyse de l'empreinte environnementale complète de nos modèles de production, ou en étendant l'analyse de cette question des capacités des agents à amorcer une transition énergétique à d'autres caractéristiques que celles exclusivement économiques.

Références

- Beckerman W. et C. Hepburn, 2007, « Ethics of the Discount Rate in the Stern Review on the Economics of Climate Change », *World Economics*, 8(1) : 187-210.
- Brandsma A., Kancs, P. d'Artis, Monfort et A. Rillaers, 2015, « RHOMOLO: A dynamic spatial general equilibrium model for assessing the impact of cohesion policy », *Papers in Regional Science*, 94(S1) : S197-S221.

- Callonnec G., G Landa., P. Malliet et F. Reynès, 2013, « Les effets macroéconomiques des scénarios énergétiques de l'ADEME », *La Revue de l'Energie*, n° 615.
- Callonnec G., G. Landa, P. Malliet, F. Reynès et Y. Yeddir-Tamsamani, 2013, *A full description of the Three-ME model: Multi-sector Macroeconomic Model for the Evaluation of Environmental and Energy policy*.
- Callonnec G., G. Landa Rivera, P. Malliet, F. Reynès et A. Saussay, 2016, « Les propriétés dynamiques et de long terme du modèle ThreeME. Un cahier de variantes », *Revue de l'OFCE*, 149 : 1-53.
- Cambridge Econometrics, 2014, « E3ME Technical Manual, Version 6. 0 », avril.
- Capros P., D. Van Regemorter, L. Paroussos et P. Karkatsoulis, 2013, *Manual of GEM-E3*.
- Center for Global Trade Analysis – GTAP, 2014, « GTAP Models: Current GTAP Model ».
- Chateau J., Dellink R. et Lanzi E., 2014, « An Overview of the OECD ENV-Linkages Model: Version 3 », In *OECD Environment Working Papers*, n° 65.
- Christiano L. J., Eichenbaum M. S. et Trabandt M., 2017, « On DSGE Models », 1-29.
- Colander D., P. Howitt, A. Kirman, A. Leijonhufvud et P. Mehrling, 2008, *Beyond DSGE Models: Towards an Empirically-Based Macroeconomics Paper*.
- Commission présidée par Alain Quinet, 2008, *La valeur tutélaire du carbone*. Paris.
- Crassous R., J. Hourcade et O. Sassi, 2006, « Endogenous Structural Change and Climate Targets Modeling Experiments with Imacim-R », *The Energy Journal* (Special Issue) : 259-276.
- Dasgupta P., 2007, « Commentary: The Stern Review's Economics of Climate Change », *National Institute Economic Review*, 199(1) : 4-7.
- Dasgupta P., 2008, « Discounting climate change », *Journal of Risk and Uncertainty*, 37(2-3) : 141-169.
- Environmental Protection Agency et Change Division Council, 2016, « Technical Support Document: – Technical Update of the Social Cost of Carbon for Regulatory Impact Analysis », Under Executive Order 12866 – Interagency Working Group on Social Cost of Greenhouse Gases, United States Government.
- ERASME (n.d.), *The NEMESIS Reference Manual PART I*.
- Hope C., 2006, « The Marginal Impact of CO2 from PAGE2002: An Integrated Assessment Model Incorporating the IPCC's Five Reasons for Concern », *The Integrated Assessment Journal*, 6(1) : 16-56.

- Hourcade J.-C. *et al.*, 2006, « Hybrid Modelling of Energy Environment Policies: Reconciling Bottom-up and Top-down », *Energy Journal*, (Special Issue).
- Howitt P., 2006, « Coordination issues in Long-Run Growth », in Judd K. et Tesfatsion L. (eds.), *Handbook of Computational Economics: Agent-Based Computational Economics II*.
- Hwang I. C., Reynès F. et Tol R. S. J., 2017, « The effect of learning on climate policy under fat-tailed risk », *Resource and Energy Economics*, 48 : 1-18.
- Hwang I., Reynès F. et Tol R. S. J., 2013, « Climate Policy Under Fat-Tailed Risk: An Application of Dice », *Environmental and Resource Economics*, 1-22.
- IPCC, 2014, *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Kratena K., Streicher G., Temurshoev U., Amores A. F., Arto I., Mongelli I., Neuwahl F., Rueda-Cantuche J. M. et Andreoni V., 2013, *FIDELIO 1: Fully Interregional Dynamic Econometric Long-term Input-Output Model for the EU27. JRC Scientific and Policy Reports*.
- Laitner J. A. 'Skip' et Hanson D. A., 2006, « Modeling Detailed Energy-Efficiency Technologies and Technology Policies within a CGE Framework », *The Energy Journal*, SI2006(1).
- Lancaster K. J., 1966a, « A New Approach to Consumer Theory », *Journal of Political Economy*, 74.
- Lancaster K. J., 1966b, « Change and Innovation in the Technology of Consumption », *American Economic Association*, 56(1) : 14-23.
- Landa Rivera G., Reynès F., Islas Cortes I., Bellocq F.-X. et Grazi F., 2016, « Towards a low carbon growth in Mexico: Is a double dividend possible? A dynamic general equilibrium assessment », *Energy Policy*, 96 : 314-327.
- Lutz C., Meyer B. et Wolter M. I., 2010, « The global multisector/multi-country 3-E model GINFORS. A description of the model and a baseline forecast for global energy demand and CO2 emissions », *International Journal of Global Environmental Issues*, 10(1/2) : 25.
- Newberry D. M., Siebert H. et Vickers J., 1990, « Acid Rain », *Economic Policy*, 5(11) : 297-346.
- Nordhaus W. D., 1991, « A sketch of the economics of the greenhouse effect », *American Economic Review*.
- Nordhaus W. D., 2007, « A Review of the Stern Review on the Economics of Climate Change », *Journal of Economic Literature*, vol. XLV(septembre) : 65.
- Nordhaus W. D., 2013, « Integrated economic and climate modeling », In *Handbook of Computable General Equilibrium Modeling*, vol. 1.

- Pindyck R. S., 2017, « The Use and Misuse of Models for Climate Policy », *Review of Environmental Economics and Policy*, 11(1) : 100-114.
- Sassi O., Crassous R., Hourcade J. C., Gitz V., Waisman H. et Guivarch C., 2010, « IMACLIM-R: a modelling framework to simulate sustainable development pathways », *International Journal of Global Environmental Issues*, 10(1/2) : 5.
- Stern N., 2006, « The Economics of Climate Change », *Stern Review*.
- Waldhoff S., Anthoff D., Rose S. et Tol R. S. J., 2014, « The marginal damage costs of different greenhouse gases: An application of FUND », *Economics*, 8.
- Weitzman M. L., 2007, « A Review of The Stern Review on the Economics of Climate Change », *Journal of Economic Literature*, vol. XLV (septembre) : 703-724.
- Weitzman M. L., 2009, « On Modeling and Interpreting the Economics of Catastrophic Climate Change », *Review of Economics and Statistics*, 91(1) : 1-19.