



## ÉVALUATION DE L'IMPACT MACROÉCONOMIQUE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE : REVUE DES MODÈLES MACRO- ENVIRONNEMENTAUX, USAGES ET LIMITES

---

Tristan GANTOIS  
Pierre-Louis GIRARD  
Claire LE GALL

---



# ÉVALUATION DE L'IMPACT MACROÉCONOMIQUE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE : REVUE DES MODÈLES MACRO- ENVIRONNEMENTAUX, USAGES ET LIMITES

**Tristan GANTOIS\***

**Pierre-Louis GIRARD\***

**Claire LE GALL\***

Ce document de travail n'engage que ses auteurs. L'objet de sa diffusion est de stimuler le débat et d'appeler commentaires et critiques.

\* **Tristan Gantois** est en poste à la Direction Générale du Trésor au Ministère de l'Économie, des Finances et de la Souveraineté industrielle et numérique (France)

tristan.gantois@dgtresor.gouv.fr (+33-1-44-87-73-09)

\* **Pierre-Louis Girard** est en poste à la Direction Générale du Trésor au Ministère de l'Économie, des Finances et de la Souveraineté industrielle et numérique (France)

pierre-louis.girard@dgtresor.gouv.fr (+33-1-44-87-17-42)

\* **Claire Le Gall** était en poste à la Direction Générale du Trésor au Ministère de l'Économie, des Finances et de la Souveraineté industrielle et numérique (France)

## Table des matières

Résumé .....	5
Abstract .....	5
Introduction .....	6
1. Présentation des différentes catégories de modèles macro-environnementaux .....	8
1.1 Les modèles d'équilibre général calculable (EGC) .....	8
1.2 Les modèles d'évaluation intégrés (IAM).....	10
1.3 Les modèles macroéconométriques.....	12
1.4 Les modèles d'équilibre général dynamique et stochastique (DSGE).....	13
2. Présentation détaillée de cinq modèles macro-environnementaux .....	16
2.1 ThreeME .....	16
2.2 Oxford Economics.....	19
2.3 E-QUEST .....	22
2.4 G-Cubed .....	25
2.5 ENVISAGE.....	27
Conclusion .....	31
Bibliographie .....	33
Annexe : Tableau comparatif des modèles.....	36

## Résumé

Les exercices d'évaluation des politiques climatiques contribuent à garantir l'efficacité du processus d'élaboration des politiques d'atténuation du réchauffement climatique vis-à-vis des objectifs fixés. Les modèles macro-environnementaux sont utilisés dans ce cadre pour évaluer les effets de ces politiques sur l'économie dans son ensemble, par le biais d'un cadre formel cohérent. La revue de littérature des modèles à disposition des administrations publiques nationales et des institutions internationales conduit à établir quatre catégories de modèles, en fonction de la manière dont ils sont structurés et paramétrés, de leur utilisation, et de leurs limites. Il s'agit des modèles d'équilibre général calculable, des modèles macroéconométriques, des modèles d'évaluation intégrés et des modèles d'équilibre général dynamiques et stochastiques. Cette revue est complétée par la présentation détaillée de cinq modèles, selon la même approche descriptive. Une critique transversale peut être adressée à ces modèles, relative à leur manque de transparence dans leur utilisation en pratique, tant au niveau de la description des mécanismes pris en compte, que de la présentation des résultats, qui, en l'absence d'un cadre théorique unifié, limite la compréhension de l'impact des politiques sur l'économie.

## Abstract

Evaluations of climate policies help to ensure that the policy-making process of the climate change mitigation strategies is effective in achieving their objectives. Macro-environmental models are used in this context to assess the effects of these policies on the economy as a whole, through a coherent formal framework. The literature review of models that both national public administrations and international institutions use leads to the establishment of four categories of models, which depend on their structure, the way they are calibrated, their use and their limitations. These categories are computable general equilibrium models, macroeconomic models, integrated assessment models and dynamic and stochastic general equilibrium models. The review is completed by a detailed presentation of five specific models, following the same descriptive approach. One broad criticism of these models is their lack of transparency in their use in practice, both in the description of the mechanisms taken into account and in the presentation of results. In the absence of a unified theoretical framework, this lack limits the understanding of the impact of policies on the economy.

Mots clés : Transition écologique, changement climatique, modèles macroéconomiques, ThreeME, Oxford Economics, E-QUEST, G-Cubed, ENVISAGE

## Introduction<sup>1</sup>

L'augmentation des émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, liée aux activités humaines, est à l'origine du changement climatique. Celui-ci se matérialise par une augmentation de la température moyenne globale, ainsi qu'une hausse de la fréquence et de l'intensité d'événements climatiques extrêmes. En l'absence d'inflexion significative dans ces émissions, les températures moyennes pourraient être jusqu'à 5°C supérieures aux températures préindustrielles, avec des conséquences délétères potentiellement irréversibles<sup>2</sup>.

La grande majorité des pays s'est engagée à décarboner les activités économiques pour atteindre la neutralité carbone, de sorte que les émissions de gaz à effet de serre résiduelles soient compensées à terme par des puits de carbone, sous la contrainte d'un accroissement des risques physiques liés au changement climatique et des coûts liés à la transition écologique. Ces engagements devraient se concrétiser par des politiques publiques visant à inciter ou contraindre les ménages, les entreprises, le secteur financier et les administrations publiques à modifier leur comportement.

Devant l'incertitude quant à la matérialisation des effets du changement climatique et de la transition écologique, et dans une double démarche d'efficacité des politiques engagées pour atteindre les objectifs fixés et de minimisation de leur coût, les décisions publiques peuvent s'appuyer sur des évaluations régulières des mesures mises en œuvre. Pour ce faire, différents outils d'évaluation micro- et macro-économiques peuvent être mobilisés de façon complémentaire. Les études microéconomiques consistent à identifier l'impact d'une mesure donnée sur les différents agents économiques (ménages, entreprises) pour en évaluer l'efficacité par rapport aux objectifs assignés. Elles peuvent être réalisées par le biais de techniques économétriques, d'une modélisation spécifique du fonctionnement des secteurs d'intérêt ou d'études qualitatives. Les évaluations microéconomiques ne permettent toutefois pas d'identifier les potentiels effets indirects des mesures, la cohérence d'un ensemble de mesures ou encore leurs conséquences sur l'ensemble d'une économie. L'étude de ces effets procède des évaluations de l'impact macro-environnemental. Ces évaluations sont majoritairement réalisées *ex ante* à l'aide de modèles qui proposent une représentation synthétique des principales interactions économiques nationales entre les ménages, les entreprises et les administrations publiques, ainsi qu'avec le reste du monde, en tenant également compte des implications en matière énergétique et/ou environnementale<sup>3</sup>. Les deux approches micro et macro peuvent par ailleurs être imbriquées via un processus itératif où les résultats de l'une servent comme intrant à l'autre, jusqu'à obtenir des résultats convergents.

Le présent document propose une revue des différents modèles macro-environnementaux que les administrations publiques nationales – notamment en France – et les institutions internationales peuvent mobiliser. Plusieurs dizaines de modèles à destination des institutions ont ainsi été développés, certains à partir des années 1990, soit par des centres de recherche, publics ou privés, avec l'appui des administrations, soit directement par les administrations. Ils ont été utilisés pour évaluer l'impact de différentes politiques climatiques et économiques, d'accords internationaux, voire, dans certains cas, pour déterminer la trajectoire optimale d'une politique à partir d'un cadre économique et environnemental donné. En outre, cet exercice de cartographie peut contribuer à identifier les points d'amélioration prioritaires pour la modélisation macro-environnementale : la matérialisation des risques climatiques et l'identification des coûts associés à la transition écologique soulignent la capacité limitée des modèles actuels à les capturer<sup>4</sup>. L'étude des caractéristiques de chaque modèle peut également contribuer à mettre en exergue leurs complémentarités, pour une utilisation optimale de ces outils. Il est à noter que la présente revue ne tient pas compte des modèles issus de travaux académiques, davantage utilisés pour étudier des questions théoriques ciblées et non pour l'évaluation de politiques publiques, mais pouvant à terme nourrir les modèles institutionnels.

---

<sup>1</sup> Les auteurs remercient France Stratégie pour leurs précieux commentaires lors de la rédaction de ce document.

<sup>2</sup> Cf. Labrousse *et al.* (2020) pour une revue de littérature sur la quantification et la qualification des impacts du changement climatique sur l'activité économique.

<sup>3</sup> Cf. de Williencourt et Jacquetin (2019) pour une présentation générale de la modélisation macroéconomique dans l'évaluation des politiques publiques.

<sup>4</sup> Pisani-Ferry J. (2021).

La première partie propose une catégorisation des différents modèles macro-environnementaux, réalisée sur la base de leur structuration, de leur paramétrage et de leur utilisation. Cette approche permet également de souligner les principales limites de chaque catégorie – au regard de leurs caractéristiques et de leur finalité – et leurs complémentarités. La seconde partie s'intéresse, dans une démarche analogue, à présenter de façon détaillée cinq modèles, ThreeME<sup>5</sup> (développé conjointement par l'Ademe et l'OFCE<sup>6</sup>), Oxford Economics (de l'institution homonyme), E-QUEST (Commission européenne), G-Cubed (McKibbin Software Group) et ENVISAGE<sup>7</sup> (Banque mondiale).

---

<sup>5</sup> Multi-sector Macroeconomic Model for the Evaluation of Environmental and Energy policy.

<sup>6</sup> Ademe (Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) et OFCE (Observatoire français des conjonctures économiques).

<sup>7</sup> ENVironmental Impact and Sustainability Applied General Equilibrium.

# 1. Présentation des différentes catégories de modèles macro-environnementaux

La revue de littérature des modèles macro-environnementaux développés par des institutions nationales et internationales a conduit à établir quatre grandes catégories de modèles, présentées ci-dessous. Au sein de chaque catégorie, il existe une grande diversité de modèles. Si l'ensemble de ces modèles part d'une volonté partagée d'étudier les interactions entre le climat, les questions environnementales ou de transition écologique avec l'économie, leurs spécificités respectives ne leur permettent pas de répondre simultanément à l'ensemble des sujets d'intérêt. Différentes problématiques doivent donc mobiliser différents outils.

Ainsi, les mécanismes de bouclages entre économie et climat, pour notamment tenir compte des dommages liés au changement climatique, ne peuvent s'envisager que dans un modèle mondial, ou couvrant *a minima* les principaux pays émetteurs de gaz à effet de serre. Une dimension mondiale est également cruciale pour étudier les relations entre, d'un côté, la transition écologique et, de l'autre les taux d'intérêt réels, en lien avec les besoins de financement, ou l'approvisionnement en matières premières stratégiques. Autre exemple, des modèles intégrant des frictions financières ou de l'hétérogénéité parmi les agents (ménages et entreprises) peuvent être idéalement utilisés pour étudier les questions d'acceptabilité sociale de la transition écologique et de politiques d'accompagnement.

La revue de littérature présentée ci-dessous s'attache donc à souligner les avantages et inconvénients respectifs des différentes classes de modèle pour en définir leur cadre d'utilisation optimal.

## 1.1 Les modèles d'équilibre général calculable (EGC)

### a. Présentation générale

**Les modèles EGC sont construits sur la base d'un cadre théorique**, composé d'un ensemble d'équations dérivées à partir de différents programmes de maximisation sous contrainte, **et d'un cadre comptable**, cohérent avec les données mobilisées, issues des tableaux d'entrées-sorties et des balances des paiements. Ils visent à représenter les différentes interactions possibles entre les secteurs institutionnels (ménages, entreprises et administrations publiques) et les agrégats économiques retenus (consommation, revenu, emploi, activité, dépenses publiques, etc.). Ces modèles sont utilisés dans une approche positive déterministe. Ils servent notamment à quantifier l'impact de politiques publiques ou de chocs économiques, pris comme exogènes et dont la chronique est donnée, sur les variables économiques endogènes, pour un calibrage donné<sup>8</sup>. Les modèles EGC peuvent atteindre en théorie un niveau de désagrégation important, conditionné en pratique par les contraintes techniques de résolution. Cette désagrégation inclut les secteurs d'activité, qui peuvent être construits sur la base d'un modèle théorique unique, et sont ensuite différenciés par le biais des paramètres. Dans certains modèles, des secteurs spécifiques, tels que l'agriculture ou l'énergie, peuvent être remplacés par des modules technico-économiques<sup>9</sup>. La désagrégation porte également sur le volet international. Deux catégories de modèles peuvent être distinguées, selon qu'un seul pays est considéré avec une modélisation du reste du monde plus sommaire, ou que le modèle intègre plusieurs pays et/ou régions – définis selon les mêmes équations – et leurs interactions commerciales et financières.

**Sur le plan théorique, il existe deux grandes familles de modèles : les modèles néo-classiques et les modèles néo-keynésiens.** À la différence des modèles néo-classiques, les modèles néo-keynésiens intègrent des rigidités nominales (sur les salaires ou les prix) venant limiter les mécanismes d'ajustement immédiat aux chocs exogènes, et/ou générant une sous-utilisation des capacités de production.

---

<sup>8</sup> Par construction, pour que le modèle admette une solution unique, le nombre des variables endogènes doit être égal au nombre d'équations. Les paramètres sont fixés à partir de la littérature, de relations comptables et techniques ou pour répliquer certains faits macroéconomiques.

<sup>9</sup> Ces modules permettent une représentation détaillée et plus complexe faisant appel à des éléments d'ingénierie et pas uniquement économiques. Par exemple, ces modules servent à représenter la production et le transport d'électricité d'un pays.

**La grande majorité de ces modèles sont résolus de manière statique.** Dans certains cas, ils peuvent également intégrer une dynamique récursive. Le passage d'une période à une autre est alors réalisé en actualisant les paramètres – visant à capturer le progrès technique et les changements dans les préférences –, et/ou par le biais d'équations d'accumulation, en premier lieu du capital.

## b. Utilisation

**Les modèles EGC représentent la majorité des modèles développés par les institutions internationales** (19 modèles sur les 33 répertoriés). À l'inverse de certains modèles d'évaluation intégrés, les modèles EGC ne servent pas à déterminer une trajectoire optimale d'une politique conditionnée par un objectif économique, social ou environnemental (typiquement, la trajectoire de taxe carbone qui garantirait la neutralité carbone à un horizon temporel donné). Ils servent à évaluer des politiques économiques, dont la trajectoire est fixée par hypothèse, en dehors du modèle.

**En pratique, ces modèles ont été mobilisés pour évaluer les stratégies, nationales et internationales, de transition écologique.** En France, l'évaluation macroéconomique de la stratégie nationale bas-carbone (SNBC) a été réalisée à l'aide des modèles néo-keynésiens ThreeME, développé conjointement par l'Ademe et l'OFCE, et IMACLIM<sup>10</sup>, du CIREN<sup>11</sup>. Le paquet « Fit-for-55 » de la Commission européenne a été évalué à l'aide du modèle néo-classique GEM-E3<sup>12</sup> d'E3M-Lab<sup>13</sup>. À l'échelle nationale, des modèles ont également été construits pour évaluer l'impact de l'introduction d'une fiscalité carbone. Enfin, les scénarios de projection économique, démographique et environnementale peuvent s'appuyer sur ces modèles. Par exemple, l'OCDE a utilisé le modèle ENV-Linkages pour construire l'*Environmental Outlook to 2050*<sup>14</sup>.

## c. Limites<sup>15</sup>

**Une première critique de ces modèles, souvent également valide pour les modèles macroéconomiques de manière générale, porte sur leur manque de transparence**, qui croît significativement avec leur taille et leur degré de complexité. Ce manque de transparence concerne plusieurs éléments centraux de ces modèles, 1) les mécanismes de transmission de l'impact des variables exogènes, 2) les bouclages macroéconomiques, notamment au niveau du financement de l'économie et de la sphère publique, 3) le traitement des données utilisées et 4) le paramétrage des équations. Par ailleurs, les sorties de ces modèles s'avèrent sensibles au calibrage.

**L'absence d'un socle théorique commun conduit à avoir des résultats hétérogènes, voire opposés entre modèles.** En outre, les choix de modélisation conditionnent largement les résultats des évaluations<sup>16</sup>. Ce biais peut générer de l'incertitude quant aux effets estimés des politiques de la transition écologique, notamment si les mécanismes modélisés et les hypothèses faites ne sont pas clairement expliqués.

**Le fait que les modèles soient statiques, ou modélisent une dynamique de manière récursive, empêche d'inclure les effets d'anticipation des agents économiques.** Par exemple, une trajectoire connue de hausse de la fiscalité carbone devrait théoriquement inciter les agents économiques à entreprendre des investissements ou à modifier leur comportement dès le court terme pour en atténuer le coût économique futur anticipé. Cependant, ce type de mécanisme n'est que rarement capturé par les modèles EGC. Plus généralement, une résolution statique du modèle ne permet pas de tenir compte des comportements d'optimisation intertemporelle et de lissage des effets des chocs.

---

<sup>10</sup> IMpact Assessment of CLIMate.

<sup>11</sup> Centre international de recherche sur l'environnement et le développement.

<sup>12</sup> General Equilibrium Model for Economy-Energy-Environment.

<sup>13</sup> Energy-Economy-Environment Modelling LABoratory.

<sup>14</sup> OCDE (2012).

<sup>15</sup> Cf. notamment Landa Rivera *et al.* (2018) pour une revue des limites des modèles EGC et d'évaluation intégrée.

<sup>16</sup> Par exemple, pour l'évaluation du paquet « Fit-for-55 », si les impacts estimés sont globalement neutres sur l'activité et l'emploi à long terme par rapport à un scénario sans mesure, le modèle néo-keynésien E3ME conduit à estimer un impact systématiquement positif à court-moyen terme, alors que le modèle néo-classique GEM-E3 donne un impact systématiquement négatif.

**Une dernière limite concerne l'hypothèse systématique d'agent représentatif pour les ménages et les entreprises**, de sorte que les estimations ne portent que sur des comportements moyens. L'introduction de différentes catégories d'agents avec des contraintes financières permettrait de tenir compte de l'impact asymétrique des mesures et de les évaluer. Certains modèles ont pu être combinés avec un module indépendant visant à différencier les ménages par niveau de revenu, mais ces impacts ne sont pas réintégrés dans le modèle pour ajuster les sorties<sup>17</sup>. Aucun modèle n'intègre d'hétérogénéité du côté des entreprises (e.g. *via* leur productivité ou leur contrainte financière).

## 1.2 Les modèles d'évaluation intégrés (IAM<sup>18</sup>)

### a. Présentation générale

**La structure générale de ces modèles s'appuie sur deux modules, technico-environnemental et économique.** Le module technico-environnemental relie des émissions de gaz à effet de serre à une variable environnementale agrégée (par exemple les températures moyennes) dont la dégradation va se répercuter sur le module économique (sur l'activité par exemple) par le biais d'une fonction dite de dommage. Le modèle n'intègre pas de point de basculement précis à une augmentation de température donnée, car un tel point de basculement ne peut pas être déterminé de manière fiable. Le module économique modélise les émissions de gaz à effet de serre générées par la sphère économique, l'impact de la fiscalité carbone et des coûts d'abattement pour réduire les émissions. Ces modèles peuvent inclure un capital naturel pour représenter les réductions d'émissions comme des investissements visant à augmenter ce capital naturel.

Ces modèles peuvent intégrer plusieurs pays/régions et/ou secteurs d'activité. Ils se sont d'ailleurs complexifiés pour tenir compte d'un certain nombre de dimensions au-delà de la relation initiale simplifiée entre le PIB et les émissions de CO<sub>2</sub>.

Dans certaines versions de ces modèles, chaque région est supposée avoir un ensemble de préférences, représentées par une fonction de bien-être social, et optimiser sa consommation, ses politiques de réduction des émissions de carbone et ses investissements au fil du temps. La fonction de bien-être social augmente avec la consommation par habitant de chaque génération, et dans le même temps l'utilité marginale de la consommation décroît. L'importance de la consommation par habitant d'une génération dépend de sa taille relative. L'importance relative des différentes générations est mesurée à l'aide d'un taux de préférence temporelle, et la courbure de la fonction d'utilité est donnée par l'élasticité de l'utilité marginale de la consommation. Ces paramètres sont calibrés de sorte que le taux d'intérêt réel dans le modèle soit proche du taux d'intérêt réel moyen et du rendement réel moyen du capital sur les marchés. Ils déterminent aussi le taux d'actualisation, qui est essentiel pour les décisions intertemporelles des agents.

Les modèles d'évaluation intégrés ont l'avantage de rassembler l'ensemble du système socio-économique et d'évaluer différentes voies de développement démographique, économique et technologique au sein d'un même cadre scientifique cohérent en interne en vue d'évaluer la faisabilité de différents objectifs climatiques et/ou de développement durable. De nombreux modèles d'évaluation intégrés ont crû en sophistication et incluent désormais des détails technologiques considérables, un couplage entre différents systèmes, y compris l'utilisation des terres, la foresterie et l'agriculture, ou encore de l'incertitude quant à l'évolution de certaines variables.

---

<sup>17</sup> Cette approche a notamment été utilisée dans l'évaluation macroéconomique du paquet « Fit -or-55 » à l'aide du modèle GEM-E3.

<sup>18</sup> Integrated assessment models en anglais.

## b. Utilisation

**Ces modèles sont issus principalement de travaux académiques**, par exemple les modèles développés par Nordhaus (modèles DICE et RICE<sup>19</sup>), les modèles FUND<sup>20</sup> et PAGE<sup>21</sup>. Ces travaux étudient différents scénarios présentant diverses trajectoires climatiques et économiques à l'international. Ils sont utilisés dans une approche normative afin de définir la trajectoire optimale d'une politique (par exemple, la taxe carbone) pour un cadre économique et environnemental donné, et dans une approche positive pour évaluer des politiques de transition écologique.

## c. Limites

**Les modèles d'évaluation intégrés souffrent d'un manque de données et de fondements empiriques.** Certains pans du modèle, notamment stratégiques (relatifs aux fonctions de dommage par exemple), sont calibrés sinon arbitrairement, du moins sur la base d'estimations économétriques fragiles<sup>22</sup>. La modélisation de la sphère économique, en particulier de l'impact de la variation des prix sur les comportements associés des agents économiques, a souvent été fruste<sup>23</sup>. Il en va de même de l'articulation des sphères économique et environnementale, de sorte que ces modèles peuvent largement sous-estimer l'impact du changement climatique (par exemple, ils peuvent conduire à accepter des seuils d'augmentation des températures maximales acceptables bien supérieurs aux travaux de climatologues).

Malgré les améliorations récentes apportées à ces modèles, certaines dimensions théoriques font toujours défaut. Stern et Stiglitz (2021) remettent en question (i) les hypothèses économiques de ces modèles<sup>24</sup>, (ii) la capacité supposée des pouvoirs publics, en tant que planificateur social, à déterminer *a priori* une trajectoire optimale pour corriger, voire éviter, les effets négatifs du réchauffement climatique et (iii) la modélisation des chocs environnementaux, qui ne prend pas en compte des événements climatiques extrêmes aux conséquences cumulatives, voire irréversibles. En outre, le caractère non-stationnaire des différents processus économiques et environnementaux impliqués biaise les exercices de projection.

Les modèles d'évaluation intégrés sont conçus pour prendre en compte les changements progressifs des systèmes existants et ne sont donc pas très pertinents pour intégrer les avancées technologiques rapides telles que les avancées récentes dans le déploiement du solaire photovoltaïque et la baisse des coûts des énergies renouvelables et du stockage d'énergie. Le passage des moteurs thermiques aux véhicules électriques est un autre exemple de la difficulté des IAM à suivre les évolutions de l'économie réelle<sup>25</sup>. Ils ne sont pas non plus en capacité d'intégrer l'approche de points de basculement systémiques. Des changements de comportement tels qu'une diminution de la consommation de viande devraient être considérés comme entrées externes aux modèles.

Ces modèles peuvent également servir à déterminer une trajectoire optimale de la taxation carbone mais cela doit se faire en plusieurs étapes, avec des itérations. Il s'agit de déterminer en premier lieu la taxation en dehors de ces modèles, à partir d'un certain nombre d'objectifs (économiques, sociaux, environnementaux), puis d'en tester l'impact à l'aide de la modélisation sur un horizon temporel relativement court<sup>26</sup>.

---

<sup>19</sup> Dynamic Integrated Climate Economy model et Regional Integrated model of Climate and the Economy.

<sup>20</sup> Climate Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution.

<sup>21</sup> Policy Analysis of Greenhouse Effect.

<sup>22</sup> En particulier, le recours à des estimations, réalisées sur données historiques, s'appuie sur une hypothèse implicite de stabilité des coefficients. Or, la matérialisation du changement climatique risque de modifier significativement leur valeur.

<sup>23</sup> Ce fut une des critiques principales adressées au rapport Meadows du club de Rome (Meadows *et al.*, 1972) et au modèle technique sous-jacent.

<sup>24</sup> Ces modèles ne prennent pas en compte, ou alors de manière très limitée, les dimensions technologiques, financières ou d'allocation intergénérationnelle, l'endogénéité des préférences ou l'incertitude. Toutefois, l'ajout de ces différents éléments pourrait conduire à un programme de maximisation se traduisant par l'absence de solution. La modélisation serait alors inexploitable.

<sup>25</sup> La difficulté à modéliser le changement technologique dans le secteur automobile est également partagée par les autres catégories de modèles.

<sup>26</sup> Recommandation de Stern et Stiglitz (2021), *op. cit.* La démarche est notamment utilisée par Kaufman *et al.* (2020).

## 1.3 Les modèles macroéconométriques

### a. Présentation générale

**Les modèles macroéconométriques agrègent trois types d'équations, structurelles, comptables et techniques.** Les équations structurelles visent à représenter les comportements économiques des agents modélisés (ménages, entreprises, administrations publiques et reste du monde). Elles sont généralement spécifiées comme des modèles à correction d'erreur, dont les relations de long terme sont construites sur la base d'un cadre théorique (analogue à celui utilisé pour les modèles d'équilibre général). Les coefficients sont estimés économétriquement à partir de séries de données historiques. Les équations comptables garantissent la cohérence avec les données utilisées. Les équations techniques portent sur des relations entre les variables qui doivent être calibrées. Les modèles macroéconométriques incluent également des variables exogènes qui permettent de quantifier l'impact des politiques ou des chocs économiques évalués par rapport à un scénario central. Ils sont multirégionaux et multisectoriels, de sorte que le nombre d'équations, de variables et de paramètres peut être élevé<sup>27</sup>. Cette possibilité d'inclure un grand nombre d'éléments est facilitée par l'approche économétrique, là où la complexité des modèles d'équilibre général calculable est conditionnée par le calibrage. La disponibilité des données contraint toutefois le niveau de décomposition (notamment sectorielle) du modèle.

**Dans ces modèles, les modules économiques sont souvent fondés sur l'approche néo-keynésienne.** À court terme, les facteurs de demande déterminent les fluctuations macroéconomiques et à long terme l'économie suit un sentier de croissance équilibré, conditionné en premier lieu par le progrès technique et la population. L'ensemble des modèles, à l'exception du modèle GEMMES<sup>28</sup> de l'AFD<sup>29</sup>, sont à anticipations adaptatives<sup>30</sup> : des variables retardées sont incluses dans les équations économétriques pour capturer des dynamiques d'ajustement.

**En plus du volet économique, les modèles macroéconométriques peuvent intégrer deux modules supplémentaires, énergétique et environnemental, interconnectés.** L'activité économique s'appuie sur différents types d'énergie, dont l'utilisation est source d'émissions de gaz à effet de serre. Ces dernières peuvent obérer la croissance économique par le biais de fonctions de dommage. Ces deux modules s'appuient principalement sur des équations techniques calibrées, et non économétriques<sup>31</sup>. Comme pour les modèles d'équilibre général calculable, certaines composantes des modèles macroéconomiques (par exemple, la production d'électricité) peuvent être remplacées par des modules technico-économiques.

### b. Utilisation

**Neuf modèles macroéconométriques ont été identifiés dans la littérature.** Comme pour les modèles d'équilibre général calculable, les modèles macroéconométriques sont principalement utilisés dans une approche positive. Il s'agit d'évaluer l'impact macroéconomique *ex ante* de politiques de transition écologique, définies en dehors du modèle. Ils peuvent également être utilisés pour quantifier l'impact du changement climatique. Ainsi, en complément du modèle d'équilibre général calculable néo-classiques GEM-E3, le paquet « Fit-for-55 » a été évalué à l'aide du modèle macroéconométrique néo-keynésien E3ME<sup>32</sup>. Le modèle NEMESIS<sup>33</sup> de la société SEURECO<sup>34</sup> a été utilisé pour évaluer l'impact du mécanisme

---

<sup>27</sup> Par exemple, le modèle E3ME (Energy-Environment-Economy Macroeconometric Model) de Cambridge Econometrics couvre 61 pays, 69 activités pour les pays européens (43 pour les autres pays), 43 biens de consommation, 12 types d'énergie pour 23 activités utilisatrices, 33 catégories professionnelles, etc. Le nombre d'équations du modèle s'élève à plus de 50 000.

<sup>28</sup> General Monetary and Multisectoral Macrodynamics for the Ecological Shift.

<sup>29</sup> Agence française du développement.

<sup>30</sup> Le modèle GEMMES fait l'hypothèse d'anticipations limitées. De plus, à la différence des autres modèles macroéconométriques, GEMMES intègre le secteur bancaire et financier, pour tenir compte de l'impact du changement climatique et de la transition écologique sur le financement de l'économie, et admet plusieurs équilibres de long terme possibles (là où les autres modèles supposent un équilibre de long terme unique exerçant une force de rappel sur la dynamique de court terme).

<sup>31</sup> Ce choix permet d'éviter les problèmes de non-stationnarité des relations modélisées.

<sup>32</sup> Energy-Environment-Economy Macro-Econometric Model.

<sup>33</sup> New Econometric Model of Evaluation by Sectoral Interdependency and Supply.

<sup>34</sup> Société européenne d'économie.

d'ajustement carbone aux frontières. Le modèle GEMMES de l'AFD a servi à évaluer les objectifs de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> de l'accord de Paris.

### c. Limites

**Une critique récurrente adressée aux modèles macroéconométriques porte sur leur manque de transparence**, bien que ce soit moins le cas que pour les modèles d'équilibre général calculable et les modèles d'équilibre général dynamique et stochastique. Certes, il est plus aisé de suivre les mécanismes à l'œuvre et le bouclage macroéconomique dans les modèles macroéconométriques structurels que dans ces deux autres types de modèles. Toutefois, le nombre important d'équations et de variables, généralement dû à la multiplication d'un même modèle par pays et par secteur, limite la compréhension des mécanismes de propagation des chocs simulés. Ce problème peut également concerner le traitement des données issues de bases hétérogènes, qui doit garantir la cohérence du modèle, ainsi que le paramétrage des équations techniques et des modules énergétiques et environnementaux.

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

À l'exception du modèle GEMMES de l'AFD, **le recours à l'hypothèse d'anticipation adaptative dans ces modèles ne permet pas d'étudier les mécanismes d'anticipation des agents économiques.** Cet élément pourrait être important dans les évaluations des politiques de transition écologique (*cf.* les modèles ECG *supra*). De manière analogue, le recours à l'hypothèse d'agents représentatifs oblige à n'estimer que des impacts en moyenne. Les modèles macroéconométriques ne permettent donc pas de tenir compte directement des éventuels effets asymétriques des chocs simulés<sup>35</sup>.

## 1.4 Les modèles d'équilibre général dynamique et stochastique (DSGE<sup>36</sup>)

### a. Présentation générale

**Les modèles d'équilibre général dynamique et stochastique (DSGE) sont développés à partir d'un modèle théorique faisant interagir des agents représentatifs et rationnels** (ménages, entreprises). Les comportements de ces agents sont micro-fondés, c'est-à-dire qu'ils maximisent sous contrainte (budgétaire pour les ménages, technologique ou de demande pour les entreprises) une fonction objectif (l'utilité pour les ménages, le profit pour les entreprises) et de manière intertemporelle. Ces modèles font l'hypothèse d'anticipations rationnelles : dans les modèles de base, les ménages sont « Ricardiens » ou non-contraints financièrement, et peuvent prévoir les effets des politiques économiques à venir pour ainsi ajuster de façon optimale leur comportement intertemporel (de même pour les entreprises). Il s'agit d'une hypothèse forte, qui peut conduire à mésestimer les impacts macroéconomiques des chocs à court terme et qui n'est pas nécessairement validée par les travaux empiriques sur données individuelles. Plusieurs alternatives ont été développées pour pallier ces limites, *via* l'introduction d'hétérogénéité parmi les agents, de sorte à ce qu'une partie ne puisse pas opérer des optimisations intertemporelles, ou *via* la modélisation d'anticipations limitées conduisant à accroître l'incertitude avec l'horizon temporel.

---

<sup>35</sup> Comme pour les modèles d'équilibre général calculable, les modèles macroéconométriques peuvent être couplés avec un module indépendant visant à différencier les ménages par niveau de revenu, mais ces impacts ne sont pas réintégrés dans le modèle pour ajuster les sorties. Du côté des entreprises, outre des décompositions par secteur d'activité, frustes, ces modèles n'intègrent pas d'autres formes d'hétérogénéité.

<sup>36</sup> Abréviation usuelle, pour Dynamic and stochastic general equilibrium model.

À la différence des modèles d'équilibre calculable qui sont déterministes, **les modèles DSGE incluent des chocs exogènes stochastiques et une dimension intertemporelle plus développée**, laquelle permet d'étudier les mécanismes d'adaptation des agents économiques aux annonces de politiques publiques et, de façon générale, à tous chocs incertains (par exemple, évolution du progrès technique ou changement dans les préférences des ménages). Ces modèles sont pertinents pour étudier les fluctuations économiques de court terme autour d'un équilibre stationnaire qui est calculé *a priori*. Ils s'avèrent moins adaptés pour estimer l'impact de chocs permanents sur la trajectoire de croissance à long terme du fait de problèmes méthodologiques : ces chocs impliquent une modification de l'équilibre stationnaire, qui est difficile à calculer.

**Ces modèles s'appuient généralement sur la théorie néo-keynésienne, c'est-à-dire qu'ils font l'hypothèse d'un certain nombre de rigidités à court terme, levées à long terme.** Les prix et les salaires sont partiellement rigides en raison des monopoles dans le secteur des biens intermédiaires (à la Dixit et Stiglitz permettant de faire intervenir des taux de marge) et des frictions dans l'ajustement des prix nominaux (à la Calvo ou à la Rotemberg<sup>37</sup> ralentissant l'ajustement des prix). Les modèles DSGE actuels incluent également des rigidités réelles sur les marchés des facteurs de production et sur les marchés financiers<sup>38</sup>. Du fait des rigidités nominales, la politique monétaire a un effet sur l'activité, et la banque centrale est supposée fixer le taux d'intérêt nominal de sorte à réduire les distorsions engendrées par les chocs économiques.

**La structure DSGE implique le respect d'un cadre comptable strict.** En particulier, tous les agents sont sujets à des contraintes de budget (gouvernement compris), et les prix et quantités sont déterminés à chaque période de sorte à égaliser l'offre et la demande sur tous les marchés simultanément. Dès lors, une partie des paramètres peuvent être estimés à l'aide de méthodes bayésiennes ou calibrés de sorte à ce qu'ils soient cohérents avec des conditions initiales. La simulation des chocs est réalisée à partir de l'équilibre de long terme, ou état stationnaire. La complexité de ces modèles implique que le nombre de pays/zones géographiques représentés est limité (en général au maximum à trois).

**Deux options principales ont été développées pour modéliser les questions environnementales dans les modèles DSGE.** La première option consiste à avoir deux technologies substituables en concurrence, brune et verte, qui interviennent dans la production. L'utilisation de la technologie brune génère des émissions de gaz à effet de serre dont l'augmentation limite la croissance de la production agrégée par le biais de fonctions de dommage, analogues à celles utilisées dans les autres catégories de modèles présentées ci-dessus. La technologie verte n'émet pas de gaz à effet de serre. La seconde option vise à construire un secteur de l'énergie, émetteur de gaz à effet de serre, dont le bien produit peut être utilisé par les entreprises ou consommé par les ménages. Le secteur de l'énergie peut faire intervenir des ressources épuisables. Ces modèles intègrent également de la fiscalité carbone ainsi que des mécanismes d'abattement par lesquels les entreprises émettrices de gaz à effet de serre et assujetties à la fiscalité carbone peuvent les réduire en acceptant de payer un certain montant compensatoire.

---

<sup>37</sup> Une modélisation à la Calvo suppose que seule une partie des entreprises peut modifier son prix à chaque période. Avec une approche à la Rotemberg, toutes les entreprises peuvent ajuster leur prix mais font face à un coût qui croît d'autant plus que la modification du prix est importante.

<sup>38</sup> Une part de ces rigidités (e.g. coûts d'ajustement de l'investissement) est ajoutée de manière *ad hoc afin* de répliquer la persistance de certains chocs tel qu'observée dans les données, et ne peut être considérée comme structurelle.

**Les modèles sont construits en combinant plusieurs de ces éléments théoriques en fonction du sujet étudié.** Par exemple, ces modèles peuvent ne pas intégrer de distinction entre des ménages ricardiens ou keynésiens<sup>39</sup>. Les rigidités peuvent porter sur les prix uniquement et laisser une fixation flexible des salaires. En outre, en supposant que l'option de deux technologies, brune et verte, est retenue, la dynamique d'ajustement de la structure productive peut faire l'objet de modélisations différentes. La dynamique peut être représentée par un mécanisme d'entrée-sortie à la Melitz<sup>40</sup> ou à l'aide de coûts fixes<sup>41</sup>.

## b. Utilisation

**Les modèles DSGE sont majoritairement développés dans un cadre académique pour étudier des questions macroéconomiques spécifiques.** La Commission européenne a également développé une version de QUEST, son modèle DSGE néo-keynésien, pour étudier les problématiques environnementales (dénommé E-QUEST). Le modèle a notamment été utilisé pour évaluer le paquet « Fit-for-55 », en complément des modèles EGC néo-classique GEM-E3 et macroéconométrique postkeynésien E3ME. Ces modèles sont utilisés dans une approche positive pour évaluer l'impact des politiques de transition écologique modélisées à l'aide de chocs exogènes.

## c. Limites

**Comme pour les modèles d'équilibre général calculable et les modèles macroéconométriques, une critique récurrente adressée aux modèles DSGE porte sur leur manque de transparence.** Le nombre d'équations et de paramètres dans ces modèles limite la compréhension de leur fonctionnement et des mécanismes à l'œuvre dans la transmission des chocs à l'ensemble de l'économie.

**Les modèles DSGE requièrent aussi des hypothèses de modélisation fortes.** En pratique, ces modèles sont peu utilisés en raison de leur manque de souplesse : ils sont peu maniables et à partir d'une certaine taille, le modèle n'admet pas de solution. Des modèles comme QUEST III R&D<sup>42</sup>, sont composés de plusieurs centaines d'équations, de sorte qu'ils doivent être entièrement calibrés et les valeurs initiales et finales données. Ces contraintes limitent les possibilités de modifier ces modèles et les cantonnent à l'utilisation de simulation à partir des chocs exogènes. Ces contraintes imposent également d'arbitrer les mécanismes à modéliser : un modèle DSGE ne peut pas inclure l'ensemble des éléments théoriques présentés ci-dessus.

---

<sup>39</sup> Cette modélisation peut s'avérer fruste dans la mesure où il s'agit de fixer de manière exogène deux catégories de ménages ayant une dynamique différente. Par ailleurs, sur la base de la revue de littérature réalisée, ces modèles n'intègrent jamais de distinction entre entreprises en fonction de leurs contraintes financières.

<sup>40</sup> Finkelstein Shapiro et Metcalf (2021).

<sup>41</sup> Ferrari et Pagliari (2021).

<sup>42</sup> In 't Veld *et al.* (2009).

## 2. Présentation détaillée de cinq modèles macro-environnementaux

Cette partie présente de manière détaillée cinq modèles, ThreeME, Oxford Economics, E-QUEST, G-Cubed et ENVISAGE : leur structure générale, les mécanismes macroéconomiques pertinents modélisés, les principales limites ainsi que l'usage par les institutions qui les ont développés.

### 2.1 ThreeME

**Le modèle ThreeME est un modèle d'équilibre général calculable** (cf. la partie I ci-dessus pour une présentation générale des différents types de modèles), développé conjointement par l'OFCE et l'Ademe. Il modélise de façon détaillée l'économie française, qui interagit avec le reste du monde dont la représentation est plus fruste (sur la base de processus exogènes). Il est utilisé pour l'évaluation de politiques publiques, en premier lieu environnementales (avec, par exemple, l'évaluation *ex ante* de l'impact macroéconomique de la Stratégie nationale bas carbone – SNBC), mais également économiques (par exemple, le CICE<sup>43</sup>). Le modèle est entièrement calibré à partir de la littérature, ainsi que de plusieurs bases de données, de l'Insee pour les éléments se rapportant à la comptabilité nationale et aux dépenses des ménages, de l'Ademe pour les classes de véhicules, du Ceren<sup>44</sup> pour les consommations d'énergies et les émissions de CO<sub>2</sub> et du CGDD<sup>45</sup> pour le bouquet énergétique de l'industrie. Le modèle a également été répliqué pour d'autres pays (Pays-Bas, Indonésie et Mexique). Les simulations sont généralement réalisées jusqu'à l'horizon 2050, à une fréquence annuelle.

#### a. Présentation générale du modèle

**ThreeME est un modèle hybride** au sens où sont conciliées une approche top-down classique, où les équations sont dérivées à partir de différents programmes de maximisation sous contrainte, et une approche bottom-up qui s'appuie sur un module technique d'ingénieur pour modéliser les décisions des ménages relatives à la consommation énergétique, à la rénovation thermique et à l'achat de logements et de véhicules. Cette approche introduit notamment des effets non-linéaires dans le modèle, qui peuvent avoir un impact significatif sur les résultats. Les variables afférentes aux administrations publiques (recettes et dépenses) évoluent avec l'activité. Les autorités monétaires fixent le taux directeur de manière proportionnelle à l'inflation française uniquement. Celui-ci intervient ensuite dans la fixation de tous les taux d'intérêt afférents aux ménages et aux entreprises.

**Le modèle s'inscrit dans le courant keynésien** : la grande majorité des variables économiques (production, emploi, prix, salaires, taux d'intérêt, etc.) s'ajuste lentement sur la base de l'hypothèse d'anticipations adaptatives des agents économiques (ménages et entreprises). Ainsi, à court terme, les rigidités nominales font que l'offre s'ajuste à la demande actuelle (consommation et investissement). L'offre affecte également la demande avec retard, via les demandes de facteur de production (emploi, capital, énergie, consommations intermédiaires) et la fixation des prix et des salaires. À long terme, le modèle est néo-classique au sens de Solow : il converge vers un sentier de croissance équilibré, qui se caractérise par une croissance généralement constante pour toutes les variables du modèle, déterminée à partir des taux de croissance du progrès technique (sur le capital, le travail et l'énergie) définis par secteur, et démographique<sup>46</sup>. Si la modélisation des politiques de transition écologique peut conduire à modifier le rythme de croissance de l'économie sur l'ensemble de la période d'évaluation via le taux de croissance du progrès technique dans un secteur donné (par exemple, pour le secteur des panneaux photovoltaïques), le modèle n'intègre pas de composante de croissance endogène.

**Il s'agit d'un modèle multisectoriel** : il comprend 37 secteurs regroupés en 6 secteurs économiques (agriculture, industries manufacturières, construction, transports, services et énergie), 4 facteurs de production (le capital, le travail, les consommations intermédiaires et l'énergie) et 4 types d'énergies substituables entre elles. Les nombreuses interactions intersectorielles, par le biais des consommations

<sup>43</sup> Crédit d'impôt pour la compétitivité et l'emploi.

<sup>44</sup> Centre d'études et de recherches économiques sur l'énergie.

<sup>45</sup> Commissariat Général au développement durable.

<sup>46</sup> Cette hypothèse restrictive de taux de croissance constant peut être levée en utilisant une chronique au lieu d'un seul paramètre, pour tenir compte de changements dans l'évolution de ces deux variables, en premier lieu pour la démographie.

intermédiaires et des différentes étapes du processus de production, conduisent à avoir un grand nombre d'équations et de variables (plus de 20 000) et de paramètres (70 000). La production présente l'originalité d'être modélisée par le biais d'une fonction à élasticité constante de substitution (CES) généralisée, c'est-à-dire que les élasticités de substitution entre facteurs de production ne sont pas uniformes, mais peuvent varier pour chaque paire de facteurs existante (même si en pratique la différenciation entre paires est limitée dans le modèle).

**Le modèle intègre également deux autres modules, énergétique et climatique.** La composition du bouquet énergétique est exogène et ne dépend donc pas des prix relatifs ou de l'investissement dans les différents moyens de production énergétique. L'offre d'énergie s'ajuste au niveau de la demande des ménages et des entreprises, nette des échanges avec le reste du monde. Les émissions carbone sont ensuite calculées à partir de la consommation finale d'énergie des ménages et des entreprises et de coefficients techniques fixant l'intensité carbone pour chaque type d'énergie et agents économiques. Les émissions n'ont pas d'impact sur les variables économiques, via une éventuelle fonction de dommage.

## b. Limites du modèle

Le modèle présente plusieurs limites qui invitent à une certaine prudence quant à l'interprétation des résultats délivrés par ThreeME :

- Dans le modèle ThreeME, **il n'y a pas de distinction entre différentes catégories de ménages** – par exemple, sur le modèle des ménages ricardiens et des ménages keynésiens, tels qu'utilisés dans certains modèles DSGE – qui limiteraient leur capacité à lisser leur consommation intertemporelle en fonction des chocs économiques. De même, **les entreprises n'ont pas de contraintes financières** qui les rendraient moins sensibles aux signaux prix résultant de l'annonce de certaines mesures.
- Bien mentionnées dans les différents documents de travail présentant le modèle, **ThreeME n'intègre pas d'anticipations rationnelles** (en dehors d'une forme d'anticipations « exogènes » sous la forme de variables actualisées, construites *ex ante*, mais ne bouclant pas avec le reste du modèle).
- Comme mentionné précédemment, **le bouquet énergétique est déterminé de manière exogène**, compliquant l'utilisation et le calibrage des autres composantes du modèle de façon cohérente, notamment sur l'évolution de la fiscalité carbone.
- Contrairement aux ménages, pour lesquels l'investissement est modélisé selon une approche réaliste par le biais d'un module technique d'ingénieur (*cf. supra*), **les décisions d'investissements des entreprises ne reposent que sur les déterminants économiques usuels** d'arbitrage entre les facteurs de production et de la production antérieure. Dès lors, les entreprises peuvent modifier la composition de leur appareil productif et notamment de leur bouquet énergétique – modulo les coûts d'ajustement auxquels elles font face – sans qu'il soit nécessaire de réaliser certains investissements préalables (pour passer du pétrole aux énergies renouvelables par exemple). Cette approche contraint également à recourir à des signaux prix fictifs, dont le coût économique n'est pas intégralement pris en compte, pour pouvoir modéliser certains comportements.
- **Le taux directeur réel est supposé constant** (le taux nominal s'ajuste à l'inflation), alors que la banque centrale pourrait l'augmenter plus que proportionnellement face à un choc inflationniste (règle de Taylor), voire tenir compte de l'activité (PIB ou chômage).
- Le modèle ne tient pas compte des effets de rétroaction de l'endettement, public et privé, sur les variables macroéconomiques.

- Les conséquences d'une modélisation fruste de l'investissement productif et des taux d'intérêt sont **l'absence d'effet d'éviction de l'investissement** (vert vs brun, public vs privé) et des difficultés à traiter des questions d'obsolescence accélérée d'une partie du stock de capital.
- **Le modèle ne permet pas de traiter certaines frictions** pouvant renchérir le coût de la transition écologique à court/moyen terme, telles que l'impact macroéconomique de la hausse de l'endettement (public et privé) ou les problèmes d'adéquation des compétences.

Ainsi, l'évaluation de la deuxième version de la SNBC avec le modèle ThreeME montre que la transition écologique aurait un impact économique et écologique positif immédiat, en contradiction avec certains travaux récents (Pisani-Ferry, 2021). L'absence de frictions et de certains coûts d'ajustement à court terme conduit à avoir un double dividende de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> et d'un gain macroéconomique en activité et en emploi.

### c. Travaux et bibliographie

Deux documents de travail présentent de manière détaillée le modèle ThreeME :

- Callonnec *et al.* (2013) présente la deuxième version du modèle. Cette version a notamment été utilisée pour l'évaluation *ex ante* de l'impact macroéconomique de la SNBC2.
- Callonnec *et al.* (2021), présente la troisième version du modèle, qui devrait être utilisée pour l'évaluation de la nouvelle version de la SNBC, en cours d'élaboration.

Le modèle a été utilisé pour l'évaluation des politiques de transition écologique en France, ainsi que dans d'autres pays :

- Ministère de la transition écologique et solidaire (2020) détaille les résultats de l'évaluation *ex ante* de l'impact macroéconomique de la SNBC2 réalisée à l'aide des modèles ThreeME et IMACLIM du CIREAD. Cette évaluation s'appuie sur la comparaison de deux scénarios, un premier, dit « Avec Mesures Existantes », qui porte sur l'ensemble des mesures prises par l'État jusqu'au 1<sup>er</sup> juillet 2017 afin de réduire les émissions de CO<sub>2</sub>, et un second, dit « Avec Mesures Supplémentaires », qui décrit une trajectoire visant à atteindre la neutralité carbone en 2050. Ces deux scénarios sont modélisés à l'aide d'un ensemble de chocs exogènes calibrés hors modèle, majoritairement sur la base d'études microéconomiques préalables, ou de sorte à atteindre certains objectifs sectoriels. Ces évaluations font état d'un double dividende où la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> s'accompagnerait d'une augmentation immédiate de l'activité. L'investissement aurait un effet d'entraînement important, par les mécanismes keynésiens multiplicateur et accélérateur usuels. De plus, la transition écologique entraînerait une modification des coûts de production relatifs en faveur de secteurs à faible émission carbone et relativement plus intensifs en emplois.
- Callonnec *et al.* (2020) fournit une actualisation de l'évaluation de la SNBC2, en supposant une taxe carbone gelée à son niveau de 2018, et en retirant l'ensemble des signaux prix fictifs *ad hoc*<sup>47</sup>. L'absence de ces deux composantes limite la hausse de l'activité, toujours portée par les effets d'entraînement de l'investissement et par le développement de secteurs à faible émission carbone intensifs en emplois. Les objectifs de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> ne sont par ailleurs pas tenus.
- Bulavskaya et Reynès (2018) réplique le modèle ThreeME sur données néerlandaises afin d'étudier l'impact macroéconomique de la décarbonation du bouquet énergétique, dont l'évolution est fixée en dehors du modèle. L'évaluation fait état d'un double dividende où le développement des énergies renouvelables conduirait à une augmentation immédiate de l'activité grâce aux effets

<sup>47</sup> Un signal-prix est dit *ad hoc* lorsqu'il sert à atteindre des cibles intermédiaires de la SNBC, notamment en matière de consommation énergétique, sans qu'il soit associé à une mesure réglementaire quelconque et qu'il ait fait l'objet d'une évaluation microéconomique préalable.

d'entraînement de l'investissement et au développement de secteurs à faible émission carbone intensifs en emplois.

- Bellocq *et al.* (2016) calibre le modèle ThreeME sur données mexicaines pour analyser l'impact économique et climatique de l'introduction et du renforcement d'une taxe carbone. Deux scénarios de neutralité carbone à l'horizon 2050 sont considérés, avec ou sans recyclage des recettes de la taxe carbone aux ménages et aux entreprises (respectivement sous forme de baisses d'impôt sur le revenu et de cotisations sociales). En l'absence de redistribution, l'augmentation de la fiscalité carbone provoquerait une baisse permanente de l'activité et de l'emploi (choc d'offre négatif). À l'inverse, une redistribution des recettes aux ménages et aux entreprises neutraliserait l'effet récessif d'une hausse de la fiscalité carbone et générerait un double dividende grâce aux effets d'entraînement de l'investissement et au développement de secteurs à faible émission carbone intensifs en emplois.

ThreeME a également été mobilisé pour l'évaluation de certaines politiques économiques :

- Heyer *et al.* (2020) utilise le modèle ThreeME pour évaluer l'impact macroéconomique du CICE, en le recalibrant sur la base d'estimations économétriques réalisées sur données macro-sectorielles.

## 2.2 Oxford Economics

**Le modèle Oxford Economics est un modèle macroéconométrique** développé depuis 1990 par Oxford Economics, une entreprise commerciale associée à l'Université d'Oxford. Il s'agit d'un modèle multirégional couvrant 86 pays en détail et 6 blocs régionaux permettant de modéliser implicitement 120 pays qui interagissent par le biais de relations commerciales, de relations financières (taux de change et taux d'intérêt) et de prix. Les pays ou blocs régionaux affichent généralement la même structure d'équations – laquelle est parfois plus détaillée pour certains pays avancés – à l'exception de certains pays fortement dépendants d'un secteur spécifique (e.g. pétrole). Le modèle repose principalement sur des équations de comportement à correction d'erreur, dont les coefficients sont estimés sur les données historiques des différents pays ou issus de la littérature académique. En pratique, le modèle permet de réaliser des simulations sur un horizon de 30 ans, à fréquence trimestrielle. Le modèle présente notamment un intérêt pour apprécier les effets de contagion internationaux de chocs localisés, mais aussi de pouvoir prendre en compte l'équilibre épargne-investissement au niveau mondial.

### a. Présentation générale du modèle

**Oxford Economics repose principalement sur une approche top-down classique** et compte plus de 60 000 équations. Pour chaque pays et région, l'économie est composée de ménages, d'entreprises, d'une autorité monétaire et d'une autorité budgétaire.

- **Le modèle inclut un unique ménage représentatif** dont la consommation dépend à court terme du revenu et du taux d'intérêt réel, et à long terme du revenu disponible, des conditions de crédit (reflétant la disponibilité des crédits dans l'économie), du taux d'intérêt réel, de la valeur du marché immobilier et de la richesse financière nette. Les ménages perçoivent un salaire, des transferts de l'État et des revenus financiers nets, et paient des impôts et taxes sur les revenus du travail. Ils offrent du travail au secteur des biens finaux.

- **La fonction de production des entreprises intègre du travail, du capital et des consommations intermédiaires** (commodités énergétiques, commodités non-énergétiques et biens non-énergétiques) pour produire des biens finaux destinés aux marchés domestique et étranger. Sur le long terme, la production potentielle est déterminée par l'offre de travail ajustée du capital humain, par le capital et la productivité globale des facteurs. Les échanges commerciaux distinguent les biens énergétiques, les biens non-énergétiques et les services. **Le modèle est par ailleurs multisectoriel, en ce qu'il propose une répartition de la valeur ajoutée et de l'emploi par secteur d'activité.** Pour chacun des secteurs disponibles<sup>48</sup>, la demande totale est calculée comme une moyenne pondérée de la valeur ajoutée dans les autres secteurs et des dépenses finales, avec des pondérations issues de tableaux entrées-sorties exogènes au modèle.
- **L'autorité budgétaire ne suit pas de règle budgétaire explicite.** Par défaut, l'autorité monétaire suit une règle de Taylor standard dans la majorité des économies avancées.

**Oxford Economics est un modèle estimé dans un cadre keynésien à court terme et néoclassique à long terme.** À court terme, des rigidités affectent les prix des facteurs et l'activité est déterminée par la demande agrégée, tandis que sur le long terme, les propriétés néoclassiques permettent un ajustement des prix et l'équilibre est déterminé par des facteurs d'offre (productivité, travail, capital). **Par ailleurs, le modèle repose par défaut sur l'hypothèse d'anticipations adaptatives des agents.** Néanmoins, Oxford Economics permet de choisir des anticipations rationnelles qui influencent alors le taux de change, le taux d'intérêt et le prix des actifs financiers.

**Le modèle inclut également deux modules fondés sur une approche *bottom-up* permettant d'introduire (i) l'impact économique du réchauffement climatique et (ii) le marché de l'énergie électrique.** (i) Au sein de chaque pays, la demande d'énergies brunes est à l'origine d'émissions de carbone contribuant aux émissions de carbone mondiales ainsi qu'à l'élévation des températures. Cette dernière affecte *in fine* la productivité totale des facteurs de façon différenciée dans chaque pays modélisé. (ii) Sur le marché de l'électricité, la demande est estimée pour différents secteurs (industrie, services, transport routier, autres transports) et agents (ménages, entreprises...), en fonction de leur production (pour les secteurs) ou de la croissance démographique (pour les ménages) ainsi que de leur intensité énergétique – qui dépend notamment des prix à la production de l'électricité et du degré d'électrification de la demande. L'offre y répond en exploitant diverses sources d'électricité dont l'exploitation est ordonnée : les énergies renouvelables et l'énergie nucléaire (supposées exogènes) répondent dans un premier temps à la demande totale d'électricité, puis la demande résiduelle d'électricité est satisfaite par le gaz, le pétrole puis le charbon<sup>49</sup>. Trois variables permettent d'introduire l'effet d'éventuelles politiques de transition énergétique. À l'échelle des pays, une taxe carbone domestique influe sur les prix des énergies fossiles. Au sein des pays et pour chaque secteur de la demande d'électricité, une variable d'électrification influe sur les élasticités de substitution entre énergies ainsi que sur les prix énergétiques, en faveur des énergies vertes. À l'échelle mondiale, une variable exogène permet quant à elle d'intégrer l'effet baissier de politiques visant à capturer les émissions de carbone mondiales (e.g. progrès technologique vert, reforestation).

---

<sup>48</sup> Pour la France par exemple, le modèle distingue 19 secteurs d'activité : agriculture et sylviculture, industrie extractive, secteur manufacturier, services collectifs 1 (électricité, gaz, vapeur et air conditionné), services collectifs 2 (eau, gestion des déchets, assainissement), construction, distribution de services, services de transport et de stockage, services aux ménages (hôtellerie et restauration), services de communication, services financiers, immobilier, services professionnels, services administratifs, administration publique, éducation, santé, services culturels et créatifs, autres services. Le nombre de secteurs disponibles varie selon les pays.

<sup>49</sup> Au-delà de l'ordre dans lequel les différentes énergies sont mobilisées pour produire de l'électricité, la production de pétrole et le gaz dépendent par ailleurs de leur capacité maximale de production et des prix énergétiques. La production de charbon s'ajuste au reste de la demande non satisfaite par les autres sources d'énergie.

## b. Les limites du modèle

Oxford Economics présente un certain nombre de limites :

- **Le modèle fait l'hypothèse d'agents représentatifs pour les ménages et les entreprises**, de sorte que les estimations ne portent que sur des comportements moyens. Le modèle ne permet donc pas de tenir compte de l'impact asymétrique des mesures sur les agents.
- **L'estimation des dommages économiques directs liés au changement climatique et des effets de certaines politiques de transition énergétique est relativement fruste.** D'une part, le modèle n'intègre pas les dommages directs sur des variables économiques des émissions de carbone, en dehors de la productivité (qui n'affecte le reste des variables qu'à long terme). En outre, il ne permet pas de distinguer les émissions de carbone par sources d'énergie ni par type de consommateur. D'autre part, les politiques domestiques de transition énergétique peuvent être modélisées à travers la progression de l'électrification des différents secteurs d'activité et des ménages. Si l'électrification contribue à la substitution des énergies vertes aux énergies brunes, elle ne prend toutefois pas en considération d'éventuels coûts de la transition énergétique à court et moyen terme, tels que la nécessité de réaliser certains investissements préalables ou l'existence de frictions.
- **Il n'est pas possible de tenir compte de l'effet des politiques visant à capturer les émissions de carbone (e.g. progrès technologique vert, reforestation) à l'échelle des pays.**
- En dépit de son caractère multi-sectoriel, **Oxford Economics ne permet pas d'apprécier l'impact des chocs sur les chaînes de valeur** car les secteurs d'activité ne sont pas reliés les uns aux autres par leurs consommations intermédiaires.
- Si les sources des séries historiques des variables du modèle sont systématiquement indiquées, **le paramétrage des équations manque de transparence.** Si Oxford Economics communique sur les ajustements dont les équations et les coefficients font l'objet à l'occasion de la mise à jour bimensuelle du modèle, il n'est toutefois pas possible d'identifier si ces derniers sont issus d'estimations économétriques ou de la littérature académique. Le manque de transparence concerne par ailleurs les mécanismes de transmission de l'impact des variables exogènes ainsi que certains effets de bouclage macroéconomique du modèle.
- **Oxford Economics ne permet pas d'apprécier l'impact de chocs d'offre (e.g. productivité) à court terme**, étant donné que les facteurs d'offre influencent principalement l'équilibre de long terme du modèle.

## c. Travaux et bibliographie

Trois documents de travail présentent le modèle Oxford Economics :

- Oxford Economics (2022) présente la dernière version du modèle.
- Oxford Economics (2020) présente l'utilisation des principales variables permettant de simuler des chocs exogènes (choc budgétaire, monétaire, confiance, etc.) ainsi que les principaux mécanismes de transmission dans le modèle.
- Oxford Economics (2021) présente succinctement l'ajout des modules relatifs au changement climatique et au marché de l'électricité.

Il n'existe pas à notre connaissance de travaux d'évaluation de l'impact du changement climatique et de la transition énergétique se fondant sur l'utilisation d'Oxford Economics<sup>50</sup>.

## 2.3 E-QUEST

**E-QUEST est un modèle d'équilibre général stochastique dynamique** (*Dynamic Stochastic General Equilibrium, DSGE*) développé par la Commission européenne en 2021. Le modèle s'appuie sur le modèle standard néo-keynésien QUEST III (In 't Veld *et al.*, 2009 et Burgert *et al.*, 2020), mais l'étend avec une désagrégation sectorielle et par source d'énergie dans un cadre multirégional. La version présentée dans le document de travail de ce modèle est établie pour deux régions, l'Union européenne et le reste du monde. Dans chaque région, l'économie se compose de ménages, d'entreprises, d'une autorité monétaire et d'une autorité budgétaire. Cette version récente du modèle QUEST est utilisée pour analyser les politiques visant à lutter contre le changement climatique.

### a. Présentation générale du modèle

À la différence des modèles à agents représentatifs (tels que ThreeME ou Oxford Economics présentés ci-dessus, ainsi que les modèles DSGE de base), ce modèle inclut **deux types de ménages** : les **ménages non-contraints financièrement** dotés d'une fonction d'utilité intertemporelle portant sur leur temps de loisir et leur consommation qu'ils maximisent sous une contrainte de budget intertemporelle, et les **ménages contraints financièrement** qui n'ont pas accès aux marchés financiers ni aux marchés des capitaux et consomment l'intégralité de leur revenu courant à chaque période. En plus de leur salaire, les deux types de ménages perçoivent divers transferts de l'État (prestations chômage, et transferts courants) et paient des impôts forfaitaires et des taxes sur les revenus du travail et des actifs (capital physique, brevets).

Tout comme dans le modèle QUEST, **les ménages offrent du travail au secteur des biens finaux**. Les travailleurs se distinguent selon leur niveau de qualification (faible, moyenne ou haute), ce qui se traduit par une productivité horaire et un salaire spécifiques à chaque niveau de qualification. Comme il existe un grand nombre de travailleurs, chacun offrant une variété de travail imparfaitement substituable, **les travailleurs sont en situation de concurrence monopolistique**. Un syndicat négocie les salaires de sorte à maximiser l'utilité des ménages étant donnée la demande de travail des entreprises.

Les ménages paient des **impôts sur les revenus du travail**, tandis que les entreprises paient une **cotisation sociale employeur**, tous deux **différenciés par type de travailleur**.

Dans chaque région, les entreprises produisent des biens et services différenciés destinés aux marchés intérieur et extérieur. **La production nécessite du travail, du capital non énergétique, des consommations intermédiaires et un capital dit « énergétique » (i.e. lié à l'utilisation d'un type d'énergie en particulier) différenciant les énergies brune et verte** (*cf. infra*). Cet agrégat offre aux entreprises des possibilités de substitution (limitées) entre des paquets capital énergétique bruns et des paquets verts. Pour l'ensemble capital-énergie brun, le capital énergétique est dédié et ne peut être combiné qu'à de l'énergie provenant de combustibles fossiles, tandis que dans l'équivalent vert, l'électricité est nécessaire pour utiliser le capital énergétique correspondant.

La principale différence entre le modèle E-QUEST et le modèle QUEST standard est l'inclusion de la substitution énergie-intrants permettant une description plus détaillée des **possibilités de substitution entre les différentes sources d'énergie pour l'ensemble des agents économiques**.

Le modèle diffère également des modèles DSGE standards en introduisant une **désagrégation sectorielle** afin d'intégrer les mesures liées à la politique climatique ciblant les **secteurs bruns et verts**.

---

<sup>50</sup> Certaines institutions internationales, banques centrales et nationales utilisent le modèle macroéconométrique NiGEM (National Institute Global Econometric Model) dans le cadre de l'analyse de scénarios en environnement international (réseau NGFS, Network for Greening the Financial System).

- Deux secteurs fournissent de l'énergie : un secteur extrait et fournit à l'économie des combustibles fossiles et un autre produit de l'électricité à partir de sources vertes (renouvelables) ou brunes. Comme les autres secteurs, ces deux secteurs peuvent importer des biens de consommation intermédiaire. Ces biens importés et les biens domestiques peuvent être substituables pour produire de l'énergie.
- Deux types de capital « énergétique » nécessitent soit des combustibles fossiles soit de l'électricité pour fonctionner, chacun étant produit séparément par un **secteur manufacturier à forte intensité de capital lié aux combustibles fossiles** (bruns) et un **autre secteur intensif en électricité** (vert).
- Le **troisième secteur producteur de capital physique (non énergétique) est l'industrie manufacturière générale, non énergétique.**
- Pour les secteurs d'activité non énergétiques restants, un secteur à forte intensité d'émissions est séparé du reste des secteurs, en étant calibré différemment au regard des émissions de gaz à effet de serre (GES) qu'il produit (*cf. infra*). L'objectif est de pouvoir examiner les conséquences de l'extension des objectifs de réduction d'émissions de la production d'énergie à d'autres secteurs non producteurs d'énergie mais à fort potentiel d'émission de gaz à effet de serre.

**Deux principales sources d'émissions de GES** sont distinguées : les émissions liées à la combustion d'énergie fossile et les autres émissions de GES (émissions de CO<sub>2</sub> des procédés industriels et émissions sans CO<sub>2</sub>). Tandis que le premier type apparaît lors de la combustion d'énergie fossile, le second type d'émissions est attribué seulement au secteur à forte intensité d'émissions. Les technologies de réduction des émissions dans le modèle traitent de ces deux types d'émissions de manière différenciée. Les émissions liées aux énergies fossiles peuvent être réduites en remplaçant ces énergies par de l'électricité, des capitaux ou des produits intermédiaires verts, tandis que la réduction des autres émissions est possible si les entreprises prennent en charge le coût d'abattement.

Le **progrès technique** est modélisé par deux canaux : 1) l'amélioration de l'**efficacité énergétique dans l'utilisation de l'électricité et des combustibles fossiles** (*autonomous energy efficiency improvement*) et 2) l'amélioration de la **productivité dans la production de capital vert** (*learning by doing, i.e. la productivité s'améliore ou les coûts baissent grâce à l'accumulation d'expérience*). Tandis que le premier canal est calibré de façon exogène, le deuxième est bien endogène au modèle, mais il n'est pas lié à des décisions d'investissements.

Tout comme dans le modèle QUEST, le gouvernement est modélisé par une **contrainte budgétaire intertemporelle** décrivant la dynamique de la dette publique, ainsi qu'un **ensemble de dépenses** (dont certaines sont endogènes car, par exemple, indexées sur le PIB), et **de taxes**, dont les taux sont exogènes, à l'exception **d'une taxe forfaitaire sur les ménages permettant d'assurer le respect de la règle budgétaire**. Par ailleurs, l'autorité monétaire suit une règle de Taylor standard.

## b. Limites du modèle

**Le gouvernement dans E-QUEST, tout comme dans QUEST, est sujet à une contrainte budgétaire intertemporelle, ce qui empêche la simulation de réformes qui ne seraient pas financées *ex post***<sup>51</sup>. En effet, la structure DSGE implique le respect d'un cadre comptable strict : la somme actualisée des futurs excédents publics doit toujours être exactement suffisante pour rembourser la dette publique courante. Ceci est garanti dans le modèle par l'existence d'une règle budgétaire. Lorsque des mesures ayant un impact sur le solde public sont simulées, la règle budgétaire ajuste le montant d'une taxe forfaitaire portant sur les ménages pour garantir le respect de la contrainte budgétaire intertemporelle du gouvernement. En conséquence, l'existence de cette règle ne permet pas d'isoler précisément l'effet des mesures évaluées,

<sup>51</sup> Il s'agit de la même règle budgétaire que dans QUEST. Ainsi, il n'est possible de ne pas financer une réforme dès la première année qu'à condition de désactiver temporairement la règle budgétaire. Cependant, elle doit être réactivée après un certain temps pour que le modèle converge.

de l'effet des variations fiscales automatiques prévues pour en assurer le financement, ce qui complique l'interprétation des résultats.

Si le modèle tient compte des anticipations tournées vers l'avenir afin de déterminer l'effet d'une politique publique annoncée, **les ménages dans E-QUEST anticipent parfaitement les chocs futurs**, ce qui constitue également une hypothèse de construction forte<sup>52</sup>. En outre, le modèle n'introduit pas d'hétérogénéité du côté des entreprises – limite récurrente des modèles macroéconomiques.

Comme tous les modèles DSGE, E-QUEST est pertinent pour étudier les fluctuations économiques de court terme autour d'un équilibre stationnaire qui est calculé *a priori*. Il s'avère moins adapté pour estimer l'impact de chocs permanents sur la trajectoire de croissance à long terme du fait de problèmes méthodologiques : ces chocs impliquent une modification de l'équilibre stationnaire, qui est difficile à calculer.

Enfin, le modèle E-QUEST est bien **moins détaillé au niveau sectoriel et régional que des modèles CGE** de grande taille mais apporte un éclairage sur les mécanismes de transmission des politiques climatiques grâce à l'optimisation intertemporelle et *forward-looking* des agents économiques ainsi qu'à la modélisation de la concurrence imparfaite combinée à des frictions nominales et réelles sur les marchés des biens et du travail.

### c. Travaux et bibliographie

Étant donné qu'E-QUEST a été développé récemment, il n'a fait l'objet que d'une publication, le document de travail le présentant (in 't Veld *et al.*, 2021). Le modèle a également été mobilisé pour évaluer l'impact macroéconomique du rehaussement des objectifs climatiques de l'Union européenne à l'horizon 2030 (Commission européenne, 2020), ayant précédé le paquet « Fit-for-55 ». La présentation des résultats est succincte : seul l'impact sur les principales variables macroéconomiques (PIB, consommation, investissement) est présenté, sans description des mécanismes sous-jacents. Le rehaussement des objectifs climatiques aurait un impact marginal sur l'activité, compris entre -0,3 et 0,1 pt de PIB à l'horizon 2030 par rapport à un scénario sans mesure, en fonction des hypothèses de politiques d'accompagnement mises en place (une subvention aux investissements ayant un impact plus fort qu'un transfert forfaitaire aux ménages). À l'horizon 2050, in 't Veld *et al.* (2021) trouvent que l'impact sur l'activité d'un renforcement de la fiscalité carbone pour atteindre les objectifs climatiques, avec recyclage des recettes, pourrait être de -0,9 à -0,6 pt selon les politiques d'accompagnement (les mesures d'offre conduisant à une moindre diminution de l'activité par rapport aux mesures de demande). Dans tous les scénarios étudiés, l'hypothèse de double dividende (augmentation de l'activité et réduction des émissions de gaz à effet de serre) n'est pas vérifiée.

En revanche, le modèle QUEST III a été utilisé pour diverses évaluations de politiques publiques au niveau européen mais aussi au niveau national pour un certain nombre de pays de l'Union européenne. In 't Veld *et al.* (2008) propose une présentation générale du modèle, ainsi que les résultats de l'impact macroéconomique d'une série de chocs de politiques économiques (soutien à la R&D, modification des taxes, etc.) et structurels (productivité, marge des entreprises, etc.). Dans le cas de la France, le modèle a été utilisé pour évaluer l'impact macroéconomique de la réforme du crédit impôt recherche (CIR) de 2008<sup>53</sup>.

---

<sup>52</sup> À titre illustratif, une hausse de la dépense publique permanente annoncée pour dans 10 ans provoque une contraction immédiate de la consommation des ménages par des effets ricardiens.

<sup>53</sup> Le Gall *et al.* (2021).

D'autres thématiques ont également pu être évaluées à l'aide de différentes versions de ce modèle : la consolidation budgétaire réalisée en Allemagne en 2010 (In 't Veld *et al.*, 2010 ; réduction de l'emploi et des salaires publics, baisse des transferts forfaitaires aux ménages, taxe forfaitaire sur les ménages non-contraints financièrement, baisse des prestations chômage), les fonds structurels et d'investissement européens (In 't Veld et Varga, 2011 ; chaque pays de l'Union européenne et le reste du monde étant modélisés), l'évolution de la dette publique espagnole (In 't Veld *et al.*, 2012), le choc de la COVID-19 et des mesures de confinement (In 't Veld *et al.*, 2020 ; en intégrant des contraintes financières sur les entreprises), et les effets d'entraînement des plans de relance nationaux (In 't Veld *et al.*, 2021 ; hausse de l'investissement public et chaque pays de l'Union européenne et le reste du monde étant modélisés ici aussi).

## 2.4 G-Cubed

**Le modèle G-Cubed est un modèle d'équilibre général calculable**, développé par Warwick McKibbin et Peter Wilcoxon, et vendu par McKibbin Software Group. Il s'agit d'un modèle multirégional où tous les pays et régions considérés – lesquels représentent l'ensemble du monde – ont la même structure d'équations et interagissent par le biais de relations financières et commerciales. Le nombre de pays et de régions varie entre dix et vingt, en fonction des besoins de l'étude à réaliser. G-Cubed est mobilisé pour des évaluations *ex ante* de politiques publiques ou de chocs, intégrant une forte dimension internationale et des externalités, telles que des accords environnementaux (protocole de Kyoto ou accords de Paris) ou commerciaux (l'ancien accord de libre-échange nord-américain). Les paramètres des équations structurelles ont d'abord été estimés pour les États-Unis<sup>54</sup>, à partir de données du Bureau of Economic Analysis ou issues de la littérature. À la différence des modèles macroéconométriques, les auteurs n'utilisent pas une approche à correction d'erreur. Ces paramètres servent ensuite à calibrer les mêmes équations des autres pays et régions. Cette approche est justifiée par le manque de données de qualité, qui empêche d'estimer économétriquement ces paramètres. Les relations comptables sont, elles, calibrées à partir des données du GTAP<sup>55</sup> (Global Trade Analysis Project). Les évaluations peuvent être réalisées sur un horizon de 100 ans. En pratique, dans la majorité des travaux, les simulations sont réalisées sur une fréquence annuelle et vont jusqu'en 2030-2050. La description s'appuie ici sur un document de travail de 2013<sup>56</sup>.

### a. Présentation générale du modèle

Le modèle est construit sur la base d'une approche top-down classique, où les équations sont dérivées à partir de différents programmes de maximisation sous contrainte. Pour chaque pays et région, **quatre agents sont modélisés**, ménages, entreprises, gouvernement et secteur financier :

- À la différence des modèles à agent représentatif (tels que ThreeME et Oxford Economics présentés ci-dessus), ce modèle inclut **deux types de ménages représentatifs, les ménages non-contraints financièrement** dotés d'une fonction d'utilité intertemporelle portant sur leur consommation qu'ils maximisent sous une contrainte de budget intertemporelle et **les ménages contraints financièrement** qui n'ont pas accès aux marchés financiers, de la monnaie et des capitaux, et qui consomment l'intégralité de leur revenu courant à chaque période. En plus de leur salaire, les deux types de ménages perçoivent des transferts de l'État et paient des taxes sur les revenus du travail.
- **Les entreprises de chaque secteur** – dont le nombre peut varier en fonction de l'analyse menée, généralement entre 10 et 20 secteurs – **produisent à partir d'une fonction de production à trois niveaux imbriqués**. Au premier niveau, une fonction de production de type CES agrège les quatre facteurs de production (capital physique, travail, énergie et consommations intermédiaires). Au deuxième niveau, les entreprises déterminent leur bouquet énergétique et la composition de leurs consommations intermédiaires issues de la production des autres secteurs (hors énergétiques) sur

<sup>54</sup> Certains paramètres n'ayant pas pu être estimés économétriquement sont fixés de sorte à être cohérents avec la littérature.

<sup>55</sup> Global Trade Analysis Project.

<sup>56</sup> McKibbin et Wilcoxon (2013).

la base de deux CES. Au dernier niveau, une CES agrège les intrants domestiques et importés. Pour le capital physique, la demande d'investissement est déterminée à partir de son prix et du Q de Tobin<sup>57</sup>. Par ailleurs, le capital physique est immobile entre les pays.

- **Le gouvernement fait face à une contrainte budgétaire intertemporelle classique**, qui dépend de la charge de la dette, des dépenses et des revenus générés par les taxes (sur les facteurs de production, les biens de consommation finale ou les émissions de gaz à effet de serre), avec une limite d'accumulation de dette publique. La demande de monnaie dépend du niveau général des prix, de la production et du taux d'intérêt, à la Marshall. Le taux d'intérêt est fixé selon une règle de Taylor classique, en fonction de l'écart de l'inflation et du taux de change à la cible de la banque centrale et de l'écart de production.
- **Le secteur financier est contraint par une règle de non-arbitrage** (parité de taux d'intérêt couverte) où, pour chaque paire de régions, les écarts de taux d'intérêt dépendent de primes de risque exogènes et du taux de change. Le capital financier est supposé parfaitement mobile entre les pays.

Sur le marché du travail, le travail est parfaitement mobile entre les secteurs d'un pays, mais immobile entre pays. Ainsi, le salaire est unique au sein d'un pays, mais peut être différent entre pays. **Les salaires sont lents à s'ajuster** (rigidité nominale), **ce qui génère du chômage à court terme**. Le modèle intègre également des coûts d'ajustement quadratiques sur l'investissement. Toutefois, le modèle ne semble pas inclure de rigidités sur les prix. **À long terme, il converge vers un sentier de croissance équilibré**, déterminé par les taux de croissances exogènes de la population, de la monnaie et de différentes variables de productivités énergétiques et non énergétiques.

**Le modèle inclut également un module climatique** : les énergies fossiles (charbon, pétrole et gaz) émettent du CO<sub>2</sub>. Il n'est pas indiqué si les émissions de CO<sub>2</sub> ont un impact sur les variables économiques, par le biais de fonction de dommage par exemple.

Du fait des nombreuses interactions entre pays/régions et entre secteurs, le modèle comprend plus de 10 000 équations.

## b. Limites du modèle

Plusieurs questions et limites peuvent être formulées :

- Dans la fonction de production, **l'utilisation d'une unique élasticité de substitution pour toutes les énergies** peut être problématique dans la mesure où cela ne permet pas de tenir compte du degré de substituabilité entre énergies, en fonction de leur niveau d'émissions de gaz à effet de serre.
- **Le modèle ne tient pas compte d'hétérogénéité parmi les entreprises**, ce qui est une limite récurrente des modèles macroéconomiques.
- Le modèle n'intègre que **deux formes de rigidités**, sur les salaires et sur l'investissement.
- **La présentation succincte de la modélisation des coûts d'abattement, des droits d'émissions de gaz à effet de serre et de la taxe carbone**, centrale dans les évaluations de politiques climatiques, ne permet pas d'en comprendre clairement le fonctionnement. La modélisation de l'offre énergétique, des émissions de gaz à effet de serre et de leur éventuel impact sur les autres variables n'est pas détaillée non plus.

---

<sup>57</sup> En finance, le coefficient Q de Tobin est défini comme le ratio entre la valeur de marché des actifs d'une entreprise et le coût de remplacement de ces actifs, qui est ensuite comparé à 1. Si le Q est supérieur à 1, l'entreprise a intérêt à investir car la valorisation du capital supplémentaire est supérieure à son coût.

- **La présentation des résultats des estimations économétriques** est sommaire.
- Par ailleurs, **le fait de calibrer les équations des autres pays et régions en fonction des États-Unis** constitue une hypothèse forte, justifiée par le manque de données au moment de l'estimation. Il est possible que les équations aient pu être estimées pour chaque pays et régions (au moins développés) depuis, grâce au développement des bases de données. Cela ne semble toutefois pas être le cas au regard des papiers les plus récents utilisant le modèle.
- Des modules technico-économiques d'ingénieur, qui permettraient de modéliser plus finement certains secteurs (énergie) ou décisions économiques (investissement, sur le modèle de ThreeME), ne semblent pas avoir été associés au modèle.

### c. Travaux et bibliographie

Deux documents de travail présentent de manière détaillée le modèle G-Cubed :

- McKibbin et Wilcoxon (1999) présente le modèle et les résultats des estimations économétriques pour les États-Unis.
- McKibbin et Wilcoxon (2013) présente le modèle et fait une revue de littérature des différentes utilisations du modèle.

Le modèle a principalement été utilisé pour cinq types d'évaluations, 1) de politiques de transition écologique, 2) de politiques commerciales, 3) de l'impact des crises financières, 4) de l'impact des pandémies et 5) de l'impact des changements démographiques.

Sur l'évaluation de politiques de transition écologique, les différents accords internationaux de réduction des émissions de gaz à effet de serre ont fait l'objet d'évaluation avec le modèle :

- McKibbin *et al.* (1999) pour le protocole de Kyoto.
- McKibbin *et al.* (2011) pour l'accord de Copenhague.
- Liu *et al.* (2020) pour l'accord de Paris.

Dans tous les cas, les engagements des pays sont traduits en trajectoire de réduction des émissions de gaz à effet de serre, pour chaque niveau géographique d'intérêt. Les auteurs calibrent ensuite les droits d'émissions ou la taxe carbone compatibles avec cette trajectoire. Le modèle conduit à estimer un **impact négatif sur l'activité**, compris entre -5 pts et -0,5 pt de PIB à l'horizon 2030 par rapport à un scénario sans mesure, en fonction de la région ou du pays considéré et de l'accord évalué. L'introduction d'une taxe carbone croissante se traduit par un choc d'offre négatif, et ce même si les recettes sont redistribuées aux ménages. La hausse de la fiscalité pénalise davantage les activités brunes que les activités vertes ne croissent, conduisant à une baisse de l'investissement agrégé. L'effet récessif est renforcé à court terme par la réaction des banques centrales à la hausse des prix provoquée par la taxe carbone. Le ralentissement de l'activité conduit à une baisse de l'emploi et des salaires, qui se répercute sur la consommation agrégée.

## 2.5 ENVISAGE

Le **modèle ENVISAGE** (*ENVironmental Impact and Sustainability Applied General Equilibrium*) est un **modèle d'équilibre général calculable (CGE) récursif dynamique multisectoriel et multirégional**, conçu par la Banque Mondiale. ENVISAGE a été développé spécifiquement pour évaluer les interactions entre les économies et l'environnement mondial en lien avec les émissions de gaz à effet de serre d'origine humaine. Il a été complété par un **module sur les émissions et le climat** qui relie directement les activités économiques aux changements de la température moyenne mondiale. De plus, il intègre une **boucle de rétroaction qui relie les changements de température aux impacts sur les variables économiques**

telles que les rendements agricoles ou les dommages créés par l'élévation du niveau de la mer. L'un des objectifs d'ENVISAGE a été de mettre l'accent sur l'économie du changement climatique pour un ensemble plus détaillé de pays en développement, ainsi que d'accorder une grande attention aux dommages économiques potentiels et aux politiques d'adaptation au changement climatique.

### a. Présentation générale du modèle

De façon standard pour les modèles CGE, les **entreprises achètent des facteurs de production** (par exemple travail et capital) pour produire des biens et des services. Les **ménages perçoivent le revenu des facteurs et demandent à leur tour les biens et services produits par les entreprises**. L'égalité de l'offre et de la demande détermine les prix d'équilibre des facteurs, des biens et des services. Le modèle est résolu comme une suite d'équilibres statiques où les facteurs de production sont exogènes pour chaque période de temps et s'accumulent au fil du temps.

La production est mise en œuvre comme une **série de fonctions imbriquées à élasticité constante de substitution** (CES) qui permet de tenir compte de la substituabilité entre tous les intrants.

Dans un premier temps, la **production d'énergie** (E) est représentée par une série de fonctions CES imbriquées. Ces dernières permettent d'agrèger la demande (au sens d'Armington) des différents secteurs selon les quatre types d'énergie (charbon, pétrole, électricité et gaz). Le premier niveau<sup>58</sup> agrège la demande de gaz et la demande de pétrole, le deuxième regroupe ce premier agrégat avec la demande de charbon et le dernier niveau, ce nouvel agrégat d'énergies fossiles avec la demande d'électricité.

La deuxième série de fonctions CES imbriquées décrit un **agrégat** (noté ci-après KLQEEN) **comportant le capital, le travail qualifié, l'eau, l'énergie et des ressources naturelles**. Le premier niveau agrège la demande de capital et celle de travail qualifié, le deuxième y ajoute la demande d'eau, le troisième la demande de ressources naturelles<sup>59</sup> et le dernier la demande d'énergie (E).

De plus, trois types de fonction de production sont mises en œuvre :

- Le premier type permet de modéliser la **production agricole** et reflète l'intensification des intrants par rapport à l'extensification des terres. Le premier niveau agrège la demande de l'agrégat KLQEEN (*cf. supra*) et la demande de terres, le deuxième agrège ce premier niveau avec la demande d'engrais, le troisième y ajoute la demande de travail non-qualifié, le quatrième la demande de consommations intermédiaires (hors engrais et énergie) et, enfin le dernier niveau agrège ces éléments et les émissions de gaz à effet de serre (GES, hors CO<sub>2</sub>) pour obtenir la production agricole ;
- Le deuxième type est pour **l'élevage de bétail**. Le premier niveau agrège d'une part la demande de nourriture pour les animaux et la demande de terres et d'autre part la demande de l'agrégat KLQEEN et la demande de travail non-qualifié, le deuxième rassemble les deux, le troisième y ajoute la demande de consommations intermédiaires (hors nourriture pour les animaux et énergie) et le dernier niveau y ajoute les émissions de GES (hors CO<sub>2</sub>) pour obtenir la production de bétail ;
- Le dernier type est utilisé pour les **autres secteurs** et tourne principalement autour de la substituabilité capital/travail. Le premier niveau agrège la demande de l'agrégat KLQEEN et la demande de terres, le deuxième niveau y ajoute la demande de travail non-qualifié, le troisième la demande de consommations intermédiaires (hors énergie) et le dernier y ajoute les GES (hors CO<sub>2</sub>)

---

<sup>58</sup>Pour faciliter la compréhension, le premier niveau correspond au niveau le plus désagrégé de la fonction CES et les niveaux successifs à des niveaux de plus en plus agrégés.

<sup>59</sup> La demande de ressources naturelles varie selon les secteurs et peut être nulle. Cela peut être du pétrole dans le secteur des transports par exemple.

Le gouvernement n'a qu'un type de dépenses dans la version principale du modèle mais d'autres versions permettent d'inclure les dépenses de recherche et développement ou d'investissement public par exemple. Le taux d'imposition s'ajuste de manière endogène selon la cible de solde primaire, qui est fixée à zéro pour que les recettes de l'État permettent de financer l'ensemble des dépenses publiques.

L'une des caractéristiques du modèle est qu'il intègre la **nouvelle base de données d'énergie GTAP qui désagrège le secteur de l'électricité de GTAP en 11 sources d'énergie différentes plus la transmission et la distribution d'électricité**. Même si la base de données contient à la fois l'offre et la demande pour ces 11 sources d'énergie, la fonction d'agrégation ne permet l'agrégation de la demande d'électricité qu'en un seul produit.

ENVISAGE intègre également les **principaux gaz à effet de serre (GES)** : carbone, méthane, protoxyde d'azote et gaz fluorés. Les émissions de GES sont générées par la consommation de matières premières (comme les carburants), l'utilisation de facteurs (par exemple des terres pour la production de riz et des troupeaux pour l'élevage) ainsi que des émissions transformées comme le méthane provenant des décharges. Un certain nombre de régimes de contrôle du carbone sont disponibles dans le modèle. Des taxes sur le carbone peuvent être imposées de manière exogène, potentiellement différenciées selon les régions. Il est possible d'exonérer des produits ou des utilisateurs finaux de la taxe carbone, partiellement ou totalement. Par exemple, les ménages peuvent être exonérés de la taxe carbone sur la consommation de gaz naturel. Le modèle permet d'introduire des plafonds d'émissions de manière flexible, où les régions peuvent être groupées sur une base multirégionale ou mondiale. En plus du système de plafonnement standard, un système de plafonnement et d'échange peut être défini pour chaque région au sein d'un groupe qui se voit attribuer un quota d'émissions initial.

La dynamique du modèle est déterminée par trois éléments :

- L'**offre de main-d'œuvre** (par niveau de qualification) croît à un rythme exogène et donc l'ajustement sur le marché du travail ne se fait que par la demande.
- L'**offre agrégée de capital** évolue selon l'équation de mouvement standard stock/flux, c'est-à-dire que le stock de capital au début de chaque période est égal au stock de capital moins les amortissements plus le niveau d'investissement de la période précédente.
- Le troisième élément est le **progrès technique**. Le modèle suppose un progrès technique qui améliore l'efficacité du facteur travail (au sens de Harrod) – calibré sur des hypothèses données concernant la croissance du PIB et les différences de productivité entre secteurs. Une partie de la croissance de la productivité du travail est liée aux dépenses de R&D, *i.e.* cette partie est alors endogène. Dans les simulations, la technologie est généralement supposée fixe aux niveaux calibrés, bien qu'elle puisse être aussi influencée par l'évolution des dépenses de R&D.

## b. Limites du modèle

Tout comme les autres modèles CGE, le degré de complexité du modèle ENVISAGE se traduit par un **manque de transparence** sur plusieurs éléments centraux du modèle, 1) les mécanismes de transmission de l'impact des variables exogènes, 2) les bouclages macroéconomiques, notamment au niveau du financement de l'économie et de la sphère publique, 3) le traitement des données utilisées et 4) le paramétrage des équations.

Plus spécifiquement, les sorties de ces modèles s'avèrent **sensibles au calibrage des paramètres du modèle** et les **choix de modélisation conditionnent largement les résultats** des évaluations. Ce biais peut générer de l'incertitude quant aux effets estimés des politiques de la transition écologique.

De plus, le modèle repose sur l'**optimisation du comportement des agents** et ne modélise pas la possibilité que certains agents ne disposent que d'informations imparfaites et ne peuvent pas prendre les décisions optimales pour atteindre leurs objectifs.

**Le fait que le modèle simule une dynamique de manière récursive empêche d'étudier les effets d'anticipation des agents économiques et de l'évolution de leurs comportements.** Face à de nouvelles politiques de transition, les agents économiques pourraient entreprendre des investissements ou modifier leur comportement dès le court terme pour en atténuer le coût économique futur anticipé. Or, ce type de mécanisme n'est pas capturé par ENVISAGE.

**Enfin, le modèle fait l'hypothèse d'agent représentatif pour les ménages et les entreprises,** de sorte que les estimations ne portent que sur des comportements moyens. Ainsi, en l'état, le modèle ne permet pas de tenir compte de l'impact asymétrique des mesures sur les agents et donc de les évaluer.

### c. Travaux et bibliographie

Van der Mensbrugghe (2017) présente la dernière version du modèle ENVISAGE.

Le modèle a servi à des **travaux d'évaluation de l'impact du changement climatique** :

- Chen *et al.* (2020) discute de l'impact macroéconomique de différentes politiques permettant une réduction des émissions de CO<sub>2</sub> européennes de 50 % à l'horizon 2030 (fiscalité carbone croissante, soutien à l'investissement, limitation des fuites de carbone). L'impact sur l'activité, évalué avec ENVISAGE, n'est pas donné. Seul l'impact d'une taxe carbone sur les ménages par catégorie de revenu est présenté. Dans le cas français, une taxe de 100 €/tCO<sub>2</sub> aurait un impact négatif sur la consommation, lequel décroît avec le niveau de revenu.
- Golub *et al.* (2020) présente les différents leviers pour que les pays producteurs de matières premières carbonées atteignent la neutralité carbone. Sur la base du modèle ENVISAGE, la transition écologique aurait un impact à long terme sur l'activité compris entre -1,5 pts et 1,5 pts de PIB par rapport à un scénario sans transition, en fonction de la politique adoptée et du niveau de coopération internationale.
- Roson et van der Mensbrugghe (2012) utilise le modèle pour estimer l'impact du changement climatique (modélisé par une hausse des températures mondiales), qui serait négatif pour la grande majorité des pays et régions modélisés. L'activité évoluerait entre +2 pts (Russie, Europe) et -12 pts (Inde) de PIB, par rapport à un scénario sans changement climatique.
- Sur l'agriculture :
  - Ahammad *et al.* (2014) compare différents modèles dans le cadre d'une évaluation de l'impact du changement climatique sur le secteur agricole (prix, rendements, etc.). Il en ressort que le modèle ENVISAGE conduit à estimer des effets parmi les plus faibles.
  - Beghin *et al.* (2010) étudie l'impact de l'augmentation des biocarburants sur l'agriculture (prix, surface cultivable, balance commerciale, etc.) et sur l'activité dans son ensemble. L'impact macroéconomique serait marginal, avec une évolution du PIB comprise entre -0,3 pt et 0,1 pt par rapport à un scénario sans mesure.
- Sur le commerce international, He *et al.* (2009) analyse l'impact macroéconomique de différents mécanismes d'ajustement carbone aux frontières visant à limiter les fuites de carbone depuis les pays développés, dans le cadre de réductions des émissions unilatérales. La mise en place d'un mécanisme d'ajustement carbone aux frontières (MACF) sur les importations limiterait les fuites, mais pénaliserait les exportations des pays émergents, en réduisant leur compétitivité. L'élargissement du MACF aux exportations des pays développés permettrait de limiter cet effet négatif sur les pays émergents.

Bussolo *et al.* (2008) et Chepeliev *et al.* (2021) combinent les sorties du modèle ENVISAGE avec un modèle de micro-simulation, Global Income Distribution Dynamics (GIDD), pour évaluer l'impact du changement climatique selon le niveau des revenus des ménages et des pays. GIDD prend comme exogène l'évolution attendue de la structure d'âge de la population, pour différentes régions du monde, en faisant des hypothèses sur les différents niveaux d'éducation via l'ajustement des données d'enquête auprès des ménages. Le modèle modifie alors les profils des ménages, l'allocation de la main d'œuvre et donc la distribution des revenus. Ces deux papiers montrent que la baisse de la croissance du PIB provoquée par la transition écologique, par rapport à un scénario sans mesure, se traduit par une augmentation de la pauvreté.

Aguiar *et al.* (2021) utilise le modèle pour évaluer la transition vers une économie circulaire dans quatre pays d'Europe centrale et orientale (Pologne, Croatie, Roumanie et Bulgarie). Le travail est en cours et aucun résultat sur l'impact macroéconomique n'est donné.

## Conclusion

Les modèles macro-environnementaux sont des outils utilisés pour l'évaluation *ex ante* des politiques de transition écologique, dans l'optique d'éclairer la décision publique. Ils sont par exemple mobilisés pour estimer l'impact macroéconomique des stratégies climatiques nationales – en France, la Stratégie Nationale Bas Carbone – et internationales – le paquet « Fit-for-55 » de la Commission européenne –, en tenant compte des externalités environnementales. Ils permettent également d'estimer *ex ante* l'impact de certaines mesures de politique économique envisagées, comme par exemple une trajectoire de taxe carbone, selon différentes modalités de recyclage.

Ces modèles peuvent intégrer jusqu'à trois types de modules qui interagissent entre eux, économique, énergétique et environnemental. Le module économique représente les comportements et les interactions possibles entre les différents agents (ménages, entreprises et administrations publiques), les secteurs d'activité et éventuellement les zones géographiques. L'approche est similaire aux modèles macroéconomiques usuels. Le module énergétique détermine la production d'énergie sur la base de comportements économiques simplifiés ou d'une modélisation technique d'ingénieur, et les prix associés en fonction des interactions avec le module économique. Le module environnemental est généralement restreint au calcul des quantités de gaz à effet de serre émises par la production et la consommation d'énergie, ainsi que la rétroaction éventuelle sur la sphère économique. Les autres dimensions de l'impact environnemental des activités économiques (artificialisation des sols, pollution, dégradation de la biodiversité, etc.) ne sont pas prises en compte par ces modèles, du fait des plus grandes difficultés techniques à les modéliser.

Quatre grandes familles de modèles coexistent, qui peuvent être distinguées en fonction de la manière dont ils sont structurés et paramétrés :

- Les modèles d'équilibre général calculable (EGC) se composent de deux types d'équations, structurelles, en modélisant les comportements des agents représentés sur la base d'un cadre théorique, et comptables, pour garantir la cohérence du modèle avec les données mobilisées, souvent issues de sources hétérogènes. Ils sont entièrement calibrés sur la base de la littérature, de relations comptables ou afin de répliquer certains résultats *ex post*. La taille de ces modèles, pouvant comporter plusieurs dizaines de milliers d'équations, contraint généralement à une résolution statique ou récursive. Dans ce second cas, les variables sont calculées à partir de l'information contemporaine et le passage d'une période à une autre est réalisé en actualisant les paramètres – pour capturer le progrès technique et les changements dans les préférences –, et/ou par le biais d'équations d'accumulation, comme le capital. Ces modèles peuvent comporter des rigidités nominales leur conférant des propriétés keynésiennes à court terme. C'est le cas du modèle ThreeME développé par l'Ademe et l'OFCE, qui a notamment été mobilisé pour l'évaluation *ex ante* de l'impact macroéconomique de la SNBC2.
- Les modèles macroéconométriques ont une structure globalement similaire aux modèles EGC. Ils se distinguent de ces derniers par le fait qu'une partie des équations structurelles est estimée à l'aide de techniques économétriques. Ces modèles présentent généralement un plus faible niveau

de désagrégation, du fait de données sectorielles insuffisantes pour les estimations, mais cette sobriété peut faciliter en revanche la compréhension des mécanismes de diffusion des chocs évalués. C'est le cas d'E3ME développé par Cambridge Econometrics, qui est l'un des modèles utilisés pour évaluer l'impact macroéconomique du paquet « Fit-for-55 ».

- Les modèles d'évaluation intégrés sont également des modèles entièrement calibrés. Là où les deux catégories de modèles précédentes sont principalement utilisées par des institutions à orientation « économique » (par exemple, des ministères), les modèles d'évaluation intégrés relèvent principalement du champ académique, y compris non économique. Ils ont notamment été utilisés dans une approche normative pour déterminer la trajectoire optimale d'une politique (par exemple, la trajectoire d'une taxe carbone pour les États-Unis) pour un cadre économique et environnemental (de réduction des émissions carbonées) donné. Les modèles DICE/RICE de William Nordhaus en sont des exemples.
- Les modèles d'équilibre général dynamique et stochastique (DSGE) reposent sur un cadre théorique strict, dans lequel tous les comportements sont micro-fondés, c'est-à-dire que les processus de prise de décision des agents sont explicitement modélisés, ce qui permet de prendre en compte l'adaptation des comportements à des changements dans l'environnement économique. Ces modèles s'appuient également sur une hypothèse d'anticipations rationnelles. Les contraintes théoriques et d'estimation limitent le nombre d'équations à quelques centaines au maximum. Ainsi, un modèle DSGE ne permet, en général, d'étudier qu'une problématique précise. En dehors du modèle E-QUEST développé par la Commission européenne pour traiter des questions environnementales et qui a servi à évaluer l'impact du paquet « Fit-for-55 », ces modèles s'inscrivent dans un cadre académique.

Les modèles d'équilibre général calculable (EGC) et les modèles macroéconométriques sont les plus utilisés au niveau institutionnel. Ces deux catégories de modèles présentent le double avantage d'un niveau de granularité généralement élevé et d'une possibilité d'utilisation pour l'évaluation macroéconomique plus générale au-delà du seul champ macro-environnemental. Par exemple, le modèle ThreeME a été mobilisé dans l'évaluation du CICE. À l'inverse, dans les modèles d'évaluation intégrés, le module économique peut être fruste et le manque de données et de fondements empiriques oblige à calibrer arbitrairement certains pans. Les modèles DSGE requièrent des hypothèses de modélisation qui en restreignent significativement l'utilisation. En outre, tous les paramètres ne peuvent pas être estimés par manque de données et certains paramètres clés se trouvent calibrés, comme par exemple l'élasticité de la taxe carbone aux émissions.

Plus généralement, les modèles macro-environnementaux font l'objet de deux critiques transversales. La première porte sur les difficultés, voire l'incapacité, des modèles à intégrer présentement certains mécanismes théoriques, qui apparaissent nécessaires pour étudier les implications macroéconomiques de la transition écologique. La prise en compte de l'hétérogénéité au sein des agents économiques reste fruste, en particulier pour les entreprises, pour lesquelles elle se limite souvent à une décomposition sectorielle. Les effets de rétroaction des variables financières, notamment de l'endettement public, sur les autres variables macroéconomiques ne sont usuellement pas non plus capturés. Par ailleurs, l'identification de risques de frictions à court terme liés à la transition écologique (en premier lieu sur la réallocation des emplois et des capitaux) devrait conduire à une modification des modèles pour qu'ils puissent en tenir compte. Une seconde critique concerne le manque de transparence dans la présentation des résultats obtenus avec ces modèles. Leur structure complexe et le grand nombre d'équations limitent *a priori* la compréhension des mécanismes à l'œuvre dans la transmission des chocs à l'ensemble de l'économie. Ensuite, les choix théoriques de modélisation ne font pas consensus et conditionnent largement les résultats des évaluations, générant de l'incertitude quant aux effets escomptés des politiques de transition écologique. En amont, des exercices plus systématiques de comparaison entre modèles visant à identifier les principales sources de divergences, parmi les hypothèses sur la spécification des équations et sur leur calibrage, contribueraient à répondre en partie à cette critique. En aval, la présentation des évaluations pourrait également être améliorée tant au niveau de la description des mécanismes pris en compte, que de la présentation des résultats.

## Bibliographie

Aguiar A., Chepeliev M., Liverani A., Farole T., van der Mensbrugghe D. et Wang L. A. (2021), “[Circular Economy Transition in the Eastern European Member States](#)”, *GTAP, Conference Paper for the Annual Conference on Global Economic Analysis*.

Banque Centrale Européenne, (2022), “[ECB staff macroeconomic projections for the euro area](#)”, Note de mars.

Insee (2022), « [La croissance et l'inflation à l'épreuve des incertitudes géopolitiques](#) », Note de conjoncture.

Ahammad H., Blanc E., Calvin K., Hasegawa T., Havlik P., Heyhoe E., Kyle P., Lotze-Campen H., Mason d'Croze D., Müller C., Nelson, G. C., Reilly J., Robertson R., Sands R. D., Schmitz C., Tabeau A., Takahashi K., Valin H., van Meijl H., van der Mensbrugghe D., von Lampe M. et Willenbockel D. (2014), “[Agriculture and climate change in global scenarios: why don't the models agree](#)”, *Article, Agricultural Economics*, vol. 45, pages 85-101.

Beghin J. C., Mevel S., Timilsina G. et van der Mensbrugghe D. (2010), “[The Impacts of Biofuels Targets on Land-Use Change and Food Supply: A Global CGE Assessment](#)”, *Iowa State University, Working Paper No. 10039*.

Belloq F., Grazi F., Islas I., Landa G. et Reynès F. (2016), “Towards a low carbon growth in Mexico: is a double dividend possible? A dynamic general equilibrium assessment », *OFCE, Working Paper*.

Bulavskaya T. et Reynès R. (2018), “Job creation and economic impact of renewable energy in the Netherlands”, *Article, Renewable Energy*, Volume 119.

Burgert M., In 't Veld J., Roeger W., Varga J. et Vogel L. (2020), “[A Global Economy Version of QUEST: Simulation Properties](#)”, *European Economy, Discussion Papers no. 126*.

Bussolo M., de Hoyos R., Medvedev D. et van der Mensbrugghe D. (2008), “[Global Climate Change and its Distributional Impacts](#)”, *The World Bank, Conference Paper for the 11th Annual Conference on Global Economic Analysis*.

De Williencourt C. et Jacquetin F. (2019), « Le recours à la modélisation macroéconomique dans l'évaluation des politiques publiques », *Direction générale du Trésor, Trésor-Éco n° 252*.

Callonnec G., Landa G., Maillet P., Reynès F. et Yeddar Tamsamani Y. (2013), “A full description of the Three-ME model: multi-sector macroeconomic model for the evaluation of environmental and energy policy”, *OFCE, Working Paper*.

Callonnec G., Gouédard H. et Jolivet P. (2020), « Évaluation d'un scénario SNBC 2 sans hausse de taxe carbone et sans prix-fictifs ad hoc », *Ademe, Direction Exécutive Prospective et Recherche*, Note.

Callonnec G., Gouédard H., Gueret A., Hamdi-Cherif M., Hu J., Landa G., Maillet P., Reynès F. et Saussay A. (2021), “ThreeME Version 3 - Multi-sector Macroeconomic Model for the Evaluation of Environmental and Energy policy - A full description”, *OFCE, Working Paper*.

Chen, J., Chepeliev M., Garcia-Macia D., Iakova D. M., Roaf J., Shabunina A., van der Mensbrugghe D. et Wingender P. (2020), “[EU Climate Mitigation Policy](#)”, *The International Monetary Fund, Departmental Paper No. 2020/013*.

Chepeliev M., Osorio-Rodarte I. et van der Mensbrugghe D. (2021), “[Distributional impacts of carbon pricing policies under the Paris Agreement: Inter and intra-regional perspectives](#)”, *Article, Energy Economics*, vol. 102, pages 105530.

Commission européenne (2020), “Stepping up Europe's 2030 climate ambition – Investing in a climate-neutral future for the benefit of our people – Impact assessment”, *Commission staff, working document*.

Ferrari M. et Pagliari M. S. (2021), "No country is an island. International cooperation and climate change", Banque de France, *Working Papers* n°2568.

Finkelstein Shapiro A. et Metcalf G. E. (2021), "The Macroeconomic Effects of a Carbon Tax to Meet the U.S. Paris Agreement Target: The Role of Firm Creation and Technology Adoption", *NBER, Working Papers* n°28795.

Golub A., Marijs C., Midgley A., Peszko G., Rogers J. Schopp A., van der Mensbrugghe D. et Ward J. (2020), "[Diversification and cooperation in a decarbonizing world: climate strategies for fossil fuel-dependent countries](#)", *The World Bank, livre*.

He J., Matto A., Subramanian A. et van der Mensbrugghe D. (2009), "[Reconciling Climate Change and Trade Policy](#)", The World Bank, *Working Paper* 09-15.

Heyer E., Saussay A., Timbeau X. et Yol N. (2020), « Évaluation de l'impact du CICE par une méthode hybride et utilisation de l'information macro-sectorielle », OFCE, *Working Paper*.

In 't Veld J., Pagano A., Ratto M., Roeger, W. et Szekely I. (2012), "[Sovereign debt sustainability scenarios based on an estimated model for Spain](#)", *European Economy, Economic Papers* no. 466.

In 't Veld J., Pfeiffer P. et Roeger W. (2020), "[The COVID19-Pandemic in the EU: Macroeconomic Transmission and Economic Policy Response](#)", *European Economy, Discussion Paper* 127.

In 't Veld J., Pfeiffer P. et Varga J. (2021), "[Quantifying Spillovers of Next Generation EU Investment](#)", *European Economy, Discussion Paper* 144.

In 't Veld J., Ratto M. et Roeger W. (2009), "[QUEST III: An estimated open-economy DSGE model of the euro area with fiscal and monetary policy](#)" », Article, *Economic Modelling*, vol. 26(1), pages 222-233.

In 't Veld J., Roeger W. et Varga J. (2008), "[Structural reforms in the EU: a simulation-based analysis using the QUEST model with endogenous growth](#)", *European Economy, Economic Paper* 351.

In 't Veld J., Roeger W. et Varga J. (2021), "[E-QUEST - A Multi-Region Sectoral Dynamic General Equilibrium Model with Energy: Model Description and Applications to Reach the EU Climate Targets](#)", *European Economy, Discussion Papers* 146.

In 't Veld J., Roeger W. et Vogel L. (2010), "[Fiscal consolidation in Germany](#)", Article, *Intereconomics*, Vol. 45/6, pp. 364-71.

In 't Veld J. et Varga J. (2011), "[A Model-based Analysis of the Impact of Cohesion Policy Expenditure 2000-06: Simulations with the QUEST III endogenous R&D model](#)", Article, *Economic Modelling*, Volume 28, pp. 647-63.

Labrousse C., Lancesseur N., Nakaa M. et Valdenaire M. (2020), « Impact économique du changement climatique : revue des méthodologies d'estimation, résultats et limites », Direction générale du trésor, *Document de travail* 2020/4.

Kaufman N., Barron A. R., Krawczyk W., Marsters P., et McJeon H. (2020), "A near-term to net zero alternative to the social cost of carbon for setting carbon prices", *Nature Climate Change* n°10, 1010-1014.

Landa Rivera G., Malliet P., Reynès F., et Saussay A. (2018), "The State of Applied Environmental Macroeconomics", Article, OFCE, *revue de l'OFCE* n°157, pp 133-149.

Le Gall C., Meignan W. et Roulleau G. (2021), « Évaluation de la réforme du Crédit Impôt Recherche de 2008 », *Trésor-Éco* n° 290, Direction générale du Trésor.

Liu W., McKibbin W., Morris A. et Wilcoxon P. (2020), "Global economic and environmental outcomes of the Paris Agreement", Article, *Energy Economics*, Volume 90, 104838.

McKibbin W., Morris A. et Wilcoxon P. (2011), "Comparing Climate Commitments: A Model Based Analysis of the Copenhagen Accord", Article, *Climate Change Economics*, Volume 2, pp 79-103.

McKibbin W., Ross M., Shackleton R. et Wilcoxon P. (1999), "Emissions Trading, Capital Flows and the Kyoto Protocol", Article, *Energy Economics*, Volume 20, pp 287-333.

McKibbin W. et Wilcoxon P. (1999), "The theoretical and empirical structure of the G-Cubed model", Article, *Economic Modelling*, Volume 16, pp 123-148.

McKibbin W. et Wilcoxon P. (2013), "A Global Approach to Energy and the Environment: The G-Cubed Model", *Handbook of CGE Modeling*, Chapter 15, pp 995-1068.

Meadows D. H., Meadows D. L., Randers J. et Behrens W. W. (1972), "The limits to growth: A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind", Universe books.

Ministère de la transition écologique et solidaire (2020), « Stratégie nationale bas carbone, Rapport d'accompagnement », Rapport.

OCDE (2012), "OECD Environmental Outlook to 2050: The Consequences of Inaction", Rapport, OECD Publishing.

Oxford Economics (2020), "Global Economic Model Shock Levers", Technical Report, août.

Oxford Economics (2021), "Climate change in the GEM", Webinar Presentation, mars.

Oxford Economics (2022), "Oxford Economics Global Economic Model", Technical Report, mars.

Pisani-Ferry J. (2021), "Climate Policy is Macroeconomic Policy, and the Implications will be significant", *Policy Brief 21-20*, Peterson Institute for International Economics.

Roson, R. et van der Mensbrugghe, D. (2012), "[Climate Change and Economic Growth: Impacts and Interactions](#)", Article, *Sustainable Economy*, Volume 4, pp 270-285.

Stern N. et Stiglitz J. E. (2021), "The Social Cost of Carbon, Risk, Distribution, Market Failures: An Alternative Approach", *NBER, Working Paper n° 28472*.

Van der Mensbrugghe D. (2017), "[The Environmental Impact and Sustainability Applied General Equilibrium \(ENVISAGE\) Model](#)", *The World Bank, Working Paper*.

## ANNEXE : TABLEAU COMPARATIF DES MODÈLES

Nom du modèle	Type de modèle	Institution (si disponible)	Nombre de pays/régions	Nombre de secteurs	Modélisation du secteur public	Horizon des projections	Utilisation du modèle/Mesures évaluées	Articles/Documents de travail
ENV-Linkages Model	Modèle EGC néo-classique dynamique	OCDE	15 ou 29 régions	29 secteurs (dont 7 pour la production d'électricité)	Oui	2050	Environmental Outlook to 2050 Modélisation du changement climatique Évaluation des politiques de transition écologique	Château J., R. Dellink et E. Lanzi (2014), "An Overview of the OECD ENV-Linkages Model: Version 3", <i>OECD Environment Working Papers</i>
ThreeME	Modèle EGC néo-keynésien dynamique	OFCE/ADEME	1 pays + Reste du monde simplifié	37 secteurs (dont 17 pour la production d'énergie)	Oui	2050	Évaluation des politiques de transition écologique (par exemple, SNBC pour la France)	Reynès F., Callonnet G., Saussay A., Landa G., Malliet P., Gueret A., Hu J., Hamdi-Cherif M. et Gouédard H; (2021), "ThreeME Version 3 - Multi-sector Macroeconomic Model for the Evaluation of Environmental and Energy policy - A full description", OFCE
IMACLIM	Modèle EGC néo-keynésien statique résolu de manière récursive, couplé avec modules sectoriels techniques Il existe trois variantes du modèle (statique, dynamique et prospectif)	CIRED	12 régions	12 secteurs (dont 5 pour la production d'énergie)	Oui	2100	Modélisation du changement climatique Évaluation des politiques de transition écologique (par exemple, SNBC pour la France)	Le Treut G. (2020), "Description of the IMACLIM-Country model: A country-scale computable general equilibrium model to assess macroeconomic impacts of climate policies", <i>Working Papers</i>
Oxford Economics	Modèle macroéconométrique néo-keynésien	Oxford Economics	86 pays+6 régions	Dépend des pays et régions (19 pour les US, la France et l'Allemagne, 12 pour le Japon, 9 pour la Chine), 3 types d'énergie : pétrole, charbon, gaz naturel	Oui	2050	Modélisation du changement climatique Évaluation des politiques de transition écologique (par exemple, taxe carbone)	Oxford Economics (2022), "The Oxford Global Economic Model"
GEMMES	Modèle macroéconométrique avec équilibres multiples et rationalité limitée	AFD	36 pays	1 secteur productif, deux types d'énergie	Oui	2300	Modélisation du changement climatique Évaluation des politiques de transition écologique (par exemple, accord de Paris)	Giraud G., Mc Isaac F., Bovari E. et Zatschina E. (2016), "Coping with the Collapse: A Stock-Flow Consistent Monetary Macrodynamics of Global Warming", <i>AFD Working Paper</i>
ACCL	Modèle macroéconométrique sans cadre théorique sous-jacent	Banque de France	30 pays/ régions	Utilisation du PIB et de la consommation finale d'énergie	Non	2100	Modélisation du changement climatique	Alestra C., Cette G., Chouard V. et Lecat R. (2020), "Advanced Climate Change Long-term model (ACCL) : un outil de modélisation des risques climatiques", Banque de France, <i>Document de travail n°759</i> .
E3ME	Modèle macroéconométrique post-keynésien	Cambridge Econometrics	61 pays/ régions	43 ou 69 secteurs (dont 6 pour la production d'énergie)	Oui	2050	Évaluation des politiques de transition écologique (par exemple, fit for 55 pour la Commission européenne)	Cambridge Econometrics (2019), "E3ME Technical Manual v6.1", Cambridge.
ENV-IMF	Modèle EGC néo-classique statique résolu de manière récursive, construit à partir d'ENVISAGE et ENV-Linkage Le modèle est en cours de développement	FMI	Actuellement 10 pays/régions (Possibilité d'avoir jusqu'à 141 pays)	55 secteurs (dont 8 pour la production d'énergie)	Non spécifié	2050	Évaluation des politiques de transition écologique (par exemple, évaluation des politiques de transition écologique aux États-Unis)	Barrett P., Bergant K., Chateau J. et Mano R. (2021), "Modeling the U.S. Climate Agenda: Macro-Climate Trade-offs and Considerations", <i>IMF Working Papers</i>
MFMMod	Modèle macroéconométrique néo-keynésien	Banque mondiale	181 pays	3 secteurs (agriculture, industries et services ; importation et exportation de pétrole modélisées)	Oui	2100	Évaluation des politiques de transition écologique, notamment dans les pays en voie de développement (par exemple, le Pakistan)	Burns A., Campagne B., Jooste C., Stephan D. et Thanh Bui T. (2019), "The World Bank Macro-Fiscal Model Technical Description", <i>Policy Research Working Paper</i> Burns A., Jooste C., Schwerhoff G. (2021), "Climate Modeling for Macroeconomic Policy: A Case Study for Pakistan", <i>Policy Research Working Paper</i> , World Bank
NEMESIS	Modèle macroéconométrique néo-keynésien, avec modules sectoriels techniques	SEURECO - ERASME	27 pays	30 secteurs (dont 5 pour la production d'énergie)	Oui	2050	Évaluation des politiques de transition écologique (par exemple, mécanisme d'ajustement carbone aux frontières)	Zagamé P., Boitier B., Fougeyrollas A., Le Mouél P., Capros P., Kouvaritakis N., Bossier F., Thierry F. et Melon A. (2013), "The NEMESIS Reference Manual" Boitier B., Fougeyrollas A., Le Hir B., Le Mouél P. et Zagamé P. (2015), "NEMESIS - A Description - First Draft"
GEM-E3	Modèle EGC néo-classique statique résolu de manière récursive	E3-Modelling	38 ou 46 pays/régions	31 ou 50 secteurs (dont 11 pour la production d'énergie)	Oui	2050	Évaluation des politiques de transition écologique (par exemple, fit for 55 pour la Commission européenne)	Capros P., Karkatsoulis P., Paroussos L. et Van Regemorter D. (2017), "GEM-E3 Model manual", E3-MODELLING IKE and E3M-Lab
E-QUEST	Modèle DSGE néo-keynésien	Commission européenne	2 régions	7 secteurs (dont 2 pour la production d'énergie)	Oui	2050	Évaluation des politiques de transition écologique (par exemple, fit for 55 pour la Commission européenne)	In 't Veld J., Roeger W. et Varga J. (2021), "E-QUEST – A Multi-Region Sectoral Dynamic General Equilibrium Model with Energy Model Description and Applications to Reach the EU Climate Targets", European Commission.
ENVISAGE	Modèle EGC statique résolu de manière récursive Dépend du GTAP	Banque mondiale	Jusqu'à 140 régions	Jusqu'à 57 secteurs (dont 4 pour la production d'énergie)	Oui	2050	Modélisation du changement climatique Évaluation des politiques de transition écologique	Van der Mensbrugge D. (2017), "The Environmental Impact and Sustainability Applied General Equilibrium model (ENVISAGE) Model Version 10.01", World Bank.
MANAGE	Modèle EGC statique résolu de manière récursive Dépend du GTAP	Banque mondiale	1 pays + Reste du monde simplifié	4 secteurs d'activité (dont 1 pour la production d'énergie)	Oui	2100	Évaluation des politiques de transition écologique	Van der Mensbrugge D. (2020), "The Mitigation, Adaptation and New Technologies Applied General Equilibrium (MANAGE) Model", World Bank.
I3E	Modèle EGC dynamique	Economic and Social Research Institute (Irlande)	1 pays + Reste du monde simplifié	32 secteurs (dont 3 pour la production d'énergie)	Oui	2054	Évaluation des politiques de transition écologique (taxe carbone)	De Bruin K. et Mert Yakut A. (2020), "Technical documentation of I3E model, version 3", ESRI survey and statistical report series.
SNoW-NO	Modèle EGC statique résolu de manière récursive, avec modules sectoriels techniques	Oslo Centre for Research on Environmentally Friendly Energy (Norvège)	1 pays + Reste du monde simplifié	46 secteurs (dont 5 pour la production d'énergie)	Oui	2030	Évaluation des politiques de transition écologique (prix du carbone)	Oslo Centre for Research on Environmentally Friendly Energy (2021), "SNoW-NO Statistics Norway's World model for Norway".

Nom du modèle	Type de modèle	Institution (si disponible)	Nombre de pays/régions	Nombre de secteurs	Modélisation du secteur public	Horizon des projections	Utilisation du modèle/Mesures évaluées	Articles/Documents de travail
SWISSGEM-E	Modèle EGC statique	Ecoplan (Suisse)	1 pays + Reste du monde simplifié	62 secteurs (nombre de secteurs de production d'énergie non indiqué)	Non spécifié	Non spécifié	Évaluation des politiques de transition écologique	Böhlinger, C. et Müller A. (2014), "Environmental Tax Reforms in Switzerland: A Computable General Equilibrium Impact Analysis", <i>Swiss Journal of Economics and Statistics</i>
G-Cubed	Modèle EGC néo-keynésien dynamique	MSG	9 ou 12 régions	Nombre de secteurs ajustable selon les versions du modèle, 12 pour le modèle usuel	Oui	100 ans	Évaluation des politiques de transition écologique : normes environnementales, taxe carbone...	McKibbin, W. J. et Wilcoxon, P. J. (2013), "A Global Approach to Energy and the Environment", <i>Handbook of Computable General Equilibrium Modeling</i> .
GreenREFORM	Modèle EGC dynamique, avec modules sectoriels techniques	DREAM (Danemark)	1 pays	59 secteurs	Oui	2100	Changement climatique, évaluation des politiques de transition écologique, évolution du mix énergétique...	<a href="https://dreamgroup.dk/publications/?categorizations=11453">https://dreamgroup.dk/publications/?categorizations=11453</a>
GCAM	Modèle d'évaluation intégré statique résolu de manière récursive	JGCR1	32 pays/régions	Non spécifié (mais production d'énergie modélisée)	Non spécifié	2050	Évaluation des politiques de transition écologique, évolution du mix énergétique, du progrès technique dans le secteur de l'agriculture, normes (contraintes sur les émissions ou standards sur les énergies renouvelables dans les portefeuilles d'investissement)	<a href="http://jgcri.github.io/gcam-doc/v5.3/toc.html">http://jgcri.github.io/gcam-doc/v5.3/toc.html</a>
	Modèle d'évaluation intégré néo-classique dynamique	Sveriges Riksbank (Suède)	8 régions	Non spécifié (mais production d'énergie modélisée)	Non	2200	Évaluation des politiques de transition environnementale, prix du carbone, développement des énergies vertes	Hassler J., Krusell P., Olovsson C., et Reiter M. (2020), "On the effectiveness of climate policies", <i>Working Paper</i> .
AIM/CGE	Modèle EGC statique résolu de manière récursive	Center for Social and Environmental Systems Research, NIES (Japon)	114 régions	19 secteurs de l'énergie et 19 autres secteurs	Non	2025, 2030 et 2050	Évaluation des politiques de transition écologique, évolution du mix énergétique	Fujimori S, Masui T. et Matsuoka Y. (2012), "AIM/CGE [basic] Manual", <i>Discussion Paper Series: Center for Social and Environmental Systems research</i> .
GTAP	Modèle EGC statique résolu de manière récursive	Center for Global Trade Analysis, Department of Agricultural Economics, Purdue University	140 régions	57 secteurs	Oui	Non spécifié	Changement climatique, évaluations des politiques de transition écologique	Corong E. L., Hertel T. W., McDougall R., Tsigas M. E. et van der Mensbrugge D. (2017), "The Standard GTAP Model, Version 7", <i>Journal of Global Economic Analysis</i> . Aguiar A., Corong E. et van der Mensbrugge D. (2019), "The GTAP Recursive Dynamic (GTAP-RD) Model: Version 1.0".
IMAGE	Modèle d'évaluation intégré néo-classique dynamique	PBL Netherlands Environmental Assessment Agency	26 régions	énergie, agriculture	Oui	2050 et 2100	Changement climatique, évaluation des politiques sur le climat, la pollution de l'air et les énergies (bioénergie) et les territoires et la biodiversité, taxe carbone, développement humain	Alkemade R., Bakkenes M., Biemans H., Bouwman A., Bouwman L., den Elzen M., Jansse J., Kram T., Lucas P., Müller C. Prins A., Stehfest E., van Minnen J. et van Vuuren D.P. (2014), "Integrated Assessment of Global Environmental Change with IMAGE 3.0", PBL Netherlands environmental assessment Agency
MERGE	Modèle d'évaluation intégré dynamique déterministe, avec un module économique de type EGC	Paul Scherrer Institute (Suisse)	10 régions	2, production de biens et secteur de l'énergie (8 sources d'énergie)	Non spécifié	2020-2100	Changement climatique, évaluation des politiques de transition écologique (accords de Paris)	Marcucci A. et Turton H. (2012), "The MERGE-ETL model: model documentation", Paul Scherrer Institut Marcucci A. (2014), "The MERGE-ETL model: 2014 assumptions and model calibration", Paul Scherrer Institute Liu W., McKibbin W. J., Morris A. C. et Wilcoxon P. J. (2019), "Global economic and environmental outcomes of the paris Agreement", The Climate and Energy Economics Project
WITCH	Modèle d'évaluation intégré dynamique	RFF CMCC, European Institute on Economics and the Environment	13 régions	(5 énergies primaires et 1 énergie secondaire)	Non spécifié	2150 (résultats plutôt sur 2005-2100)	Changement climatique, coopération internationale, différents niveaux d'adaptation (proactif vs. réactif), mise en place d'un marché de permis pour les échanges, taxe carbone (recyclée comme un transfert forfaitaire), subventions pour les dépenses de R&D vertes, normes sur la composition des portefeuilles d'investissement ou une part minimum pour les énergies renouvelables, scénarios SSP	<a href="https://doc.witchmodel.org/">https://doc.witchmodel.org/</a> Bosetti V., De Cian E., Tavoni M. et Sgobbi A. (2009), "The 2008 Witch Model: New Model Features and Baseline", <i>FEEM Working Paper</i> .
FIDELIO	Modèle macroéconométrique hybride (composantes néo-keynésiennes et néo-classiques)	Directorate General Joint Research Centre	35 pays	56 secteurs (dont 1 pour la production d'énergie)	Oui	2050	Évaluation des politiques de transition écologique	Bulavskaya T., Corsatea T., De Amores A., Hu J., Reynes F., Rocchi P., Rueda-Cantucho J. M., Salotti S., Valderas Jaramillo J. M. et Velazquez Alonso A. (2019), "FIDELIO 3 manual: Equations and data sources", <i>JRC Working Papers</i> .
GINFORS	Modèle macroéconométrique néo-keynésien	MOSUS	42 pays/régions	41 secteurs (nombre de secteurs pour la production d'énergie non précisé)	Oui	2020	Évaluation des politiques de transition écologique	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 CO <sub>2</sub> emissions", <i>International Journal of Global Environmental Issue</i>
E3.at	Modèle macroéconométrique	The Institute of Economic Structures Research	1 pays + Reste du monde simplifié	Non spécifié (mais production d'énergie modélisée)	Non spécifié	2050	Évaluation des politiques de transition écologique	Großmann A. (2014), "Forecasting the 3E's (Environment-Energy-Economy): The Austrian model e3.at".
ATCEM-E3	Modèle EGC néo-classique statique	Institute for Advanced studies	1 pays + deux régions (UE et reste du monde)	25 secteurs (dont 3 pour la production d'énergie)	Oui	Non spécifié	Évaluation des politiques de transition écologique	Revesz T. et Balabanov T. (2007), "A Guide to ATCEM-E3: AusTriAn Computable Equilibrium Model for Energy-Economy-Environment interactions", Institute for advanced studies
NEWAGE	Modèle EGC statique résolu de manière récursive	Energy Systems Modelling Project	18 pays/régions	18 secteurs (dont 5 pour la production d'énergie)	Oui	Non spécifié	Non spécifié	<a href="https://www.reem.org/newage/">https://www.reem.org/newage/</a>
GEMINI-E3	Modèle EGC statique résolu de manière récursive	EPFL (Suisse)	29 pays/régions	19 secteurs (dont 5 pour la production d'énergie)	Oui	2050	Évaluation des politiques de transition écologique (protocole de Kyoto)	Bernard A. et Vielle M. (2008), "GEMINI-E3, A General equilibrium model of International-National Interaction between Economy, Energy and the Environment", <i>Computational Management Science</i> .
CITE	Modèle EGC dynamique	École polytechnique fédérale de Zurich	1 pays + Reste du monde simplifié	12 secteurs (dont 2 pour la production d'énergie)	Non	2050	Évaluation des politiques de transition écologique	Bretscher, L. Ramer, R. et Schwark, F. (2011), "Growth effects of carbon policies: Applying a fully dynamic CGE model with heterogeneous capital", <i>Resource and Energy Economics</i>