

Modélisation macro-économique et politiques publiques : cas de la taxe environnementale

Résumé

L'objet de cet article est d'exposer les modalités d'évaluation des politiques publiques, et d'une réforme fiscale à caractère environnemental en particulier, en recourant à des modèles macro-économiques appliqués de référence. Il s'attache à montrer, à l'aide de l'exemple d'une taxe environnementale, que les évaluations de l'impact de cette politique sont marquées par une forte divergence selon la structure du modèle utilisé. Cette divergence explique, au moins en partie, les réticences des décideurs politiques à modifier les systèmes fiscaux compte tenu des contraintes écologiques.

Abstract

The purpose of this article is to outline the evaluation modalities of public policies, and tax reforms for environmental matters in particular, by using macroeconomic applied models. Through the introduction of an environmental tax, we attempt to show that divergence in the theoretical structure of the adopted model leads to a strong divergence of policy impacts assessments. This difference in models' results explains, at least partly, the reluctance of policy makers to change the tax system by taking into account environmental constraints.

Mots-clés : modélisation macroéconomique, évaluation de politique publique, taxe environnementale.

Code JEL : D58, E12, E13, E17, H23.

Yasser Y.

Tamsamani

OCP Group et
OFCE-Sciences-Po Paris
(yassertamsamani@
yahoo.fr)

Ces dernières années ont été marquées par une prise de conscience générale de la nécessité de concevoir des politiques publiques au niveau national, régional et international susceptibles d'infléchir les comportements et d'accélérer la mutation vers des modèles de production et de consommation respectueux de l'environnement. Une prise de conscience relative à l'insoutenabilité du modèle actuel de croissance qui s'est maintenant étendue, sous l'impulsion de la multiplication des accidents écologiques

graves et des tensions sur les marchés des énergies conventionnelles, aux acteurs de la société civile, aux organismes non gouvernementaux et, tout simplement, à chaque citoyen du monde.

Cette dynamique de la mutation socio-économique, accélérée par le resserrement de la contrainte écologique, a été précédée il y a plusieurs dizaines d'années et accompagnée aujourd'hui par des travaux de recherche en modélisation économique. Ces derniers ont été développés afin d'évaluer la capacité des instruments économiques et réglementaires de la politique publique à aider à rendre le mode de vie actuel plus viable à moyen et long terme et à mesurer ses coûts associés.

Le présent article traite la question du rôle joué – et qu'on fait jouer – aux techniques de modélisation macro-économique dans le processus d'élaboration et d'argumentation des politiques publiques. Afin d'illustrer le mode d'usage de ces techniques en faveur ou en défaveur d'une mesure, nous reprenons l'exemple de la taxation environnementale qui a été sujet de nombreux travaux d'évaluation basés sur les modèles macro-économiques et au cœur du débat sur la transition énergétique vers des économies décarbonées. L'article est scindé en quatre parties. La première revient sur la place de la taxation environnementale dans l'arsenal des instruments de la politique publique dédiés à la régulation des atteintes à l'environnement. La deuxième partie traite la manière dont les techniques de modélisation économiques sont introduites dans la sphère de la politique publique. Quant à la troisième et la quatrième parties, elles reprennent respectivement les principales caractéristiques des deux courants de référence en modélisation macro-économique appliquée et la nouvelle école de modélisation dite «hybride».

1. Taxe environnementale : un instrument de politique publique efficace

Depuis les travaux d'Arthur Pigou dans les années vingt, la littérature économique sur la régulation des externalités environnementales réserve une place importante aux instruments économiques correctifs, dont les principaux sont la taxe environnementale et le marché de permis négociable.

Ces instruments présentent une capacité à la fois corrective et incitative permettant d'atteindre des objectifs de réduction des flux polluants à un coût social plus faible comparativement aux instruments réglementaires. Ils permettent une répartition efficace des efforts d'internalisation des externalités négatives entre les différents acteurs économiques. Pour illustrer cette idée, nous prenons ici l'exemple de la taxe environnementale. En agissant sur les prix des produits polluants, cette dernière incite les acteurs économiques à adopter des comportements de dépollution et d'amélioration de l'efficacité énergétique tant que leur coût marginal est inférieur au taux

de la taxe. Dans le cas inverse, les agents préfèrent s'acquitter de l'impôt. *In fine*, Les efforts de dépollution sont dirigés là où ils sont les moins coûteux.

Par ailleurs, pour que le « signal prix » induit par la taxe environnementale soit intégré dans les choix des agents et produise les effets attendus, le nouvel impôt doit bien cibler l'origine des externalités, être assez fort, prévisible et durable. Ces quatre conditions ou caractéristiques permettent à la déformation du système des prix de corriger les comportements préjudiciables à la société (lorsque la taxe est forte et ciblée) et d'accélérer les changements technologiques favorables à l'environnement et à la promotion de l'efficacité énergétique (lorsque la taxe est prévisible et durable).

A contrario, la taxe environnementale ne se distinguerait guère des autres prélèvements obligatoires qui financent les fonctions régaliennes de l'Etat et dont l'objectif n'est généralement pas d'inciter à changer les modes de production et de consommation dans la société. Une telle conception purement contributive de la fiscalité implique de retenir 1) des taux d'imposition bas et 2) une assiette aussi large que possible, même si elle se révèle déconnectée de l'origine des externalités. Si ces deux conditions sont nécessaires pour pérenniser les recettes de l'Etat provenant de la taxation environnementale, elles ne garantissent pas pour autant son efficacité environnementale. Dans ce contexte, il vaudrait mieux, du côté des agents économiques, s'acquitter du montant des taxes que d'entreprendre des investissements coûteux de dépollution et d'amélioration de l'efficacité énergétique.

Dés lors, une réforme fiscale de nature à considérer la soutenabilité comme l'un de ses principes de base consiste à introduire une taxe environnementale vérifiant les quatre conditions mentionnées plus haut. Cette réforme ne devrait pas tarder face au coût élevé de l'inaction que pourrait infliger à la société (1) la montée des externalités négatives et ses conséquences en termes d'augmentation des inégalités environnementales particulièrement dans les pays en développement (Laurent, 2009).

Même si la capacité de la taxe environnementale à internaliser des externalités négatives et à enclencher un changement des comportements favorable à l'environnement n'est plus actuellement remise en question, son instauration reste néanmoins dépendante de son acceptabilité sociale et politique. Une acceptabilité pour laquelle les modèles macro-économiques jouent finalement un rôle non négligeable, qui consiste à identifier les effets d'éviction et d'entraînement de la nouvelle mesure sur les différents agents économiques et à pouvoir quantifier ses retombés sur l'activité, l'emploi et la compétitivité. A l'issue de cet exercice, la divergence des résultats socio-économiques fournis par les modèles des économistes, d'une part, et la mauvaise compréhension des sources de ces différences, d'autre part, pourraient expliquer en partie le scepticisme des acteurs politiques à mettre en place une réforme fiscale environnementale et leur réticence à engager leur économie sur le chemin du verdissement du système fiscal.

(1) Dans un cadre global, Stern N.H. (2006) estime que le coût d'inaction face à des changements climatiques représente 5 à 20 fois plus que le sacrifice que devrait supporter le système économique mondial pour faire face à des risques pareils.

2. Quel usage des modèles macro-économiques dans la sphère des politiques publiques ?

La modélisation macro-économique revêt un intérêt particulier parmi les outils de travail des économistes. Son essor a été marqué dans les années soixante-dix par, d'une part, l'élaboration des algorithmes de résolution de systèmes d'équations du type *Gauss-Seidel* et *Broyden* plus rapides que leurs prédécesseurs et garantissant l'obtention d'un équilibre après quelques itérations et, d'autre part, le développement des modèles économétriques sophistiqués compatibles avec la simulation de long terme des politiques structurelles (modèles à correction d'erreur, modèles VAR). Ces algorithmes et les méthodes d'estimation de ces modèles économétriques sont aujourd'hui déjà implémentés dans la plupart des logiciels de simulation (*Eviews*, *Stata*, *SAS*, etc.), ce qui facilite considérablement la tâche des modélisateurs. Cet essor est dû aussi au développement de la comptabilité nationale et à l'amélioration et l'élargissement des champs des bases de données.

Le besoin de recourir à la modélisation macro-économique se manifeste dès lors que, dans un monde complexe et interdépendant, où chaque comportement, ou variable, a des implications sur d'autres dans le temps et l'espace qui dépassent largement les liens directs de causalité, l'évaluation des politiques publiques devient inaccessible par un simple calcul mental ou une déduction analytique. Etant un moyen d'aide à la réflexion et à la prise de décision, le modèle macro-économique permet de synthétiser dans un cadre simplifié et cohérent l'ensemble des interactions internes et avec l'extérieur d'une économie, en instantané ou sur une trajectoire temporelle. Certains modèles macro-économiques destinés à répondre à des problématiques globales telles que les changements climatiques ou le commerce international vont jusqu'à modéliser des flux et des comportements interactifs à l'échelle mondiale. Une telle capacité de simplification des phénomènes pluridimensionnels dans ces modèles, conjuguée à un besoin croissant du chiffrage des effets de telle ou telle variante, est l'un des éléments explicatifs de ce recours accru à la modélisation macro-économique dans la sphère des politiques publiques.

En revanche, la modélisation macro-économique n'est pas toujours perçue comme un moyen facilitant le processus de prise de décision, elle est aussi une source de confusion pour les acteurs publics du fait de la divergence des résultats issus des simulations de différents modèles évaluant les effets d'une même politique publique. Une divergence qui n'est d'ailleurs qu'une preuve de la richesse de l'analyse économique et de la diversification de ses approches méthodologiques (cf. conclusion). Dans un travail de synthèse des résultats de 119 simulations d'une réforme fiscale environnementale issues des différents courants de modélisation, B. Bosquet (2000) montre que la réaction du PIB varie entre -3 à $+1,5\%$ par rapport au compte central. La moitié des études (49%) qu'il a recensées prédit une hausse du PIB et

près des trois quart (73 %) concluent à un impact positif de la réforme sur l'emploi.

Aussi, cette divergence dans les résultats des modèles pourrait tourner à l'avantage des décideurs. Ces derniers peuvent, sous la pression des lobbies, par opportunisme politique ou par conviction idéologique, recourir aux enseignements d'un modèle plutôt qu'un autre afin de défendre leur position en faisant abstraction des hypothèses constitutives du modèle utilisé et aux limites de sa structure théorique. Ceci s'applique à l'ensemble des politiques publiques dont les retombés sont quantifiables à l'aide des modèles macro-économiques et particulièrement à la fiscalité environnementale comme le mentionne explicitement le troisième rapport du GIEC (2001) :

«Lorsqu'ils adoptent une taxe nationale sur les émissions, les décideurs doivent tenir compte du point de perception, de l'assiette fiscale... Chacun de ces paramètres peut exercer une influence sur la conception adaptée d'une taxe nationale sur les émissions, et il se peut que des préoccupations d'ordre politique ou autres entrent également en ligne de compte.»

O. Godard (2007) développe une position similaire en la formulant sous forme de questions :

« Ne voit-on pas assez couramment responsables politiques et économiques mobiliser telle ou telle expertise à l'appui de leurs projets ou de leurs thèses sans être trop regardants sur les conditions dans lesquelles ladite expertise est rendue, sur ce qu'elle dit vraiment ou sur les conditions, vite oubliées quand cela arrange, de validité des conclusions ? N'arrive-t-il pas que des experts soient enjointes de parvenir à certains résultats définis d'avance, ou soient plongés dans la sidération à la découverte de ce que les décideurs leur font dire ou tirent de leurs travaux ? »

Dans un autre article publié en 2001, le même auteur mettait déjà en exergue l'ambiguïté de la relation entre la modélisation macro-économique et la position politique née de la complicité qu'il pourrait y avoir entre experts et politiciens dans le domaine de la conception et de l'évaluation des politiques publiques en général. En guise de conclusion, Godard insiste sur le fait qu'une révision de cette relation en l'adossant sur une base contractuelle claire et définie permettrait d'éviter des conclusions en faveur ou en défaveur d'une telle ou telle politique publique trop naïves et trompeuses de l'opinion publique.

3. Les deux grands courants traditionnels de la modélisation macro-économique appliquée

Le champ de la macroéconomie appliquée est riche d'approches de modélisation et de travaux empiriques d'évaluation des politiques publiques. Parmi ces approches, deux grands courants de modélisation macro-économique, complémentaires pour certains et en concurrence pour d'autres,

(2) Epaulard (1997) fournit une description synthétique et complète des caractéristiques de ces courants de modélisation et de leurs champs préférés d'application.

sont largement sollicités dans le domaine de l'évaluation des politiques publiques et de la simulation des chocs : les modèles macro-économétriques et les modèles d'équilibre général calculables (MEGC) (2).

Dans le cas particulier d'une politique publique à vocation environnementale, les enseignements qui découlent des deux approches de modélisation en simulant le même choc sont souvent d'ampleurs différentes et parfois diamétralement opposées. Si ces modèles sont appliqués à des pays ou régions différents, la différenciation des résultats d'une même réforme pourrait s'expliquer par la divergence des systèmes fiscaux ou de la structure de l'économie en général de ces pays. Sinon, cette différenciation provient souvent de l'approche théorique sous-jacente à chacune des catégories du modèle, qui ont tendance à privilégier certains effets sur d'autres et dont les liens de causalité reliant les variables économiques entre elles ne sont pas forcément les mêmes dans les deux approches.

3.1. Les modèles macro-économétriques

Les premiers résultats émanant des modèles macro-économétriques d'inspiration néo-keynésienne au début des années 90 aboutissent généralement à un coût économique négatif d'une taxe environnementale suite à un recyclage du produit de la taxe en baissant le taux d'imposition d'autres taxes plus distordantes. Ces évaluations favorables à l'instauration d'une taxe environnementale ont conduit à l'émergence de la notion de «double dividende» (3) : le renchérissement du prix de l'énergie fossile induit par une taxation de leur contenu en carbone permet conjointement de réduire les émissions polluantes (premier dividende) et d'améliorer la situation macro-économique (deuxième dividende). Dans ce type de modèle, le deuxième dividende est souvent mesuré par l'évolution de l'emploi par rapport à une situation de référence.

(3) La notion de «double dividende» renvoie ici au sens fort du concept (Gouldier, 1995) qui fait référence à un coût macroéconomique négatif d'une taxe environnementale. Consulter Chiroleu-Assouline (2001) pour une revue de la littérature théorique sur cette notion de double dividende.

(4) Notons que ce principe est contraire à la règle de non-affectation des recettes. Mais il est souvent utilisé par les autorités publiques pour arguer le fait que cette nouvelle taxe n'aura pas d'effet sur la pression fiscale totale.

L'obtention d'un «double dividende» dans ces travaux est dictée par les modalités de recyclage des recettes de la taxe, qui doivent être spécifiques à chaque économie selon la nature des distorsions de son système fiscal, tout en respectant le principe de la neutralité budgétaire (4) qui consiste à réinjecter l'intégralité des fonds levés par la nouvelle taxe dans le circuit économique. Les travaux empiriques de modélisation des effets d'une taxe environnementale sur l'économie américaine optent pour le recyclage des recettes par la réduction des prélèvements sur le capital, considérés comme plus distordants que ceux pesant sur les autres facteurs de production (Shackleton *et al.*, 1993), tandis qu'en Europe et en France en particulier, c'est l'allègement des coûts du travail qui a été privilégié (Callonnec *et al.*, 2011, 2012 ; DGII, 1992 ; Barker *et al.*, 1993 ; Beaumais et Zagamé, 1993 ; CGP, 1993 ; Detemmerman *et al.*, 1993 ; Beaumais et Godard, 1994). Cette dernière option de recyclage bénéficie d'un double avantage : premièrement, comme pour la réduction des taxes sur le capital, l'allègement des coûts

du travail permet de réduire les coûts de production et en corollaire le prix de vente pour un taux de marge donné, mais en revanche elle affecte directement et positivement l'emploi (effet de substitution), ce qui se traduit par une augmentation du revenu disponible des ménages et donc de la consommation ; deuxièmement, elle diminue l'incitation au travail informel en limitant la pression fiscale sur les activités très intenses en main-d'œuvre (bâtiment et services par exemple) (Crassous R. *et al.*, 2009).

Dans ces modèles, les résultats positifs d'un tel système de *prélèvement-redistribution* sont le produit conjoint des multiplicateurs keynésiens de la demande finale et intermédiaire et de l'accélérateur de l'investissement, de l'inertie des prix à la production qui tempore l'effet inflationniste de la mesure, et de l'inefficience du marché du travail due à l'existence du chômage involontaire.

Une taxe environnementale entraîne un effet mécanique de très court terme d'augmentation du prix de l'énergie qui se transmet aux prix à la production et à la consommation, ce qui engendre des tensions inflationnistes affectant négativement la compétitivité et le pouvoir d'achat et freinant *in fine* la croissance. Pour autant, ces tensions inflationnistes sont progressivement atténuées, du côté de l'offre, par la réduction des coûts des autres facteurs de production due à la politique de redistribution du produit de la taxe et par l'amélioration de l'efficacité énergétique due à des effets de substitution (5) factorielle profitable au capital et au travail. Du côté de la demande, la consommation finale sera relancée avec l'appréciation du pouvoir d'achat des ménages due au recours de plus en plus intensif à la main-d'œuvre qui devient relativement moins chère. Cette dynamique de la consommation, couplée avec une augmentation de l'investissement résultant d'une demande accrue du capital fixe, permet de stimuler la demande intérieure et d'engendrer un cercle vertueux de croissance et d'emploi qui tend à s'accroître par des effets multiplicateurs et accélérateurs et par une baisse tendancielle des taux de marge des entreprises (6).

Ainsi, partant d'une situation initiale sous-optimale d'une économie caractérisée par une sous-utilisation des capacités de production et l'existence du chômage involontaire, la substitution d'une taxation distordante par une autre qui l'est moins ne pourrait que rapprocher l'économie de son plein emploi. La dynamique de convergence vers le plein emploi va dépendre de la sensibilité et de la capacité d'adaptation des agents économiques aux variations du prix de l'énergie fossile, traduites conjointement par les valeurs des élasticités de substitution et du traitement du progrès technique : pour des élasticités de substitution entre l'énergie et les autres facteurs de production proches de 1 et un progrès technique améliorant la productivité de l'énergie fossile, les effets négatifs d'une taxe environnementale seront amoindris, et la dynamique de convergence vers le plein emploi sera accélérée (voir le tableau en annexe résumant les valeurs des élasticités de substitution et le traitement

(5) Les valeurs des élasticités de substitution jouent un rôle crucial dans la propagation des effets d'une réforme fiscale sur l'ensemble de l'économie, d'où la nécessité d'établir des tests de sensibilité évaluant la stabilité des résultats d'une simulation sur un intervalle de variation des valeurs de ces élasticités.

(6) Plusieurs études empiriques appliquées à l'Europe et aux États-Unis montrent le caractère contra-cyclique de l'évolution des taux de marge, Bils M. (1987) ; Rotemberg J. et Woodford M. (1991) ; Martins J.O. et Scarpetta S. (2002), qui est assimilé à un effet de la montée de la concurrence sur les prix.

de progrès technique dans les principaux modèles macro-économiques appliqués).

Les simulations d'une taxe environnementale avec recyclage du produit, à l'aide des modèles macro-économétriques de la même famille appliqués à la France, l'Europe ou les Etats-Unis, conduisent à des résultats convergents : à court terme, pour une baisse des émissions autour de 5 % par rapport au compte central, le PIB augmente en général de 0,5 %. A moyen terme, l'appréciation du PIB se confirmerait, et il pourrait atteindre 1,5 % en écart au compte central. Le caractère positif de ces résultats était à l'origine de l'apparition de l'argument « des stratégies sans regret », qui plaide pour l'élaboration d'une réforme fiscale environnementale même dans un contexte où les risques liés à la dégradation de l'environnement sont entourés d'incertitudes et où la crise économique frappe de plein fouet le système productif.

3.2. Les modèles d'équilibre général calculables

Les modèles macro-économétriques (MEGC) ont été rapidement dépassés par la nature globale et lointaine des questions environnementales soulevées, notamment depuis le Sommet de la terre à Rio en 1992 et le développement des programmes de lutte contre les changements climatiques, au détriment des MEGC d'inspiration walrasienne. Ces derniers reprochent aux premiers de faire passer tous les effets d'une réforme par les mécanismes de la demande, bien compatible avec l'analyse de conjoncture de court terme, mais qui occulte toute transmission par les mécanismes de l'offre, ce qui mettrait en doute leur optimisme relatif à une réforme fiscale environnementale : en l'absence d'une technologie de rechange (*backstop technology*) compétitive et à des niveaux faibles des élasticités de substitution factorielle, une réforme fiscale rendant l'un des facteurs de production relativement plus cher, en l'occurrence l'énergie, devrait réduire les capacités de production des secteurs et ralentir l'activité.

Les premiers modèles d'équilibre général théoriques utilisés dans l'étude des effets d'une taxe environnementale, initiés par Bovenberg et ses co-auteurs (Bovenberg et de Mooij, 1994a, 1994b; Bovenberg et Van Der Ploeg, 1994a, 1994b), écartent toute possibilité d'apparition d'un « double dividende », et l'effet sur l'emploi ne peut jamais être positif. Selon ces modèles, l'instauration d'une telle taxe est une source de distorsion supplémentaire sur les marchés des produits de consommation et des facteurs de production au profit des produits et facteurs moins intensifs en énergie. La nouvelle distorsion, qui est au moins équivalente à celle à laquelle elle se substitue pour un niveau des prélèvements obligatoires inchangé, fait basculer l'économie de sa trajectoire supposée optimale (de plein emploi), conduisant à une sous-utilisation des capacités de production contractant en corollaire l'activité et l'emploi.

Sur le plan empirique, les simulations d'une taxe environnementale à l'aide des MEGC (Bernard et Vielle, 2008a; Bréchet, 1999; Burniaux *et al.*, 1992; Paltsev *et al.*, 2005) reproduisent les mêmes résultats que les modèles théoriques *via* le canal de la baisse de la productivité marginale du travail engendrée par le recul de la demande énergétique, pour un niveau donné de production et une substitution imparfaite du travail (élasticité de substitution inférieure à 1). Cette baisse de productivité se traduit par un ralentissement des salaires bruts, pénalisant le pouvoir d'achat des ménages déjà touché par l'effet inflationniste, ce qui se répercute *in fine* sur l'activité.

En se référant encore une fois aux conditions de l'offre pour démontrer l'inefficacité de l'introduction d'une taxe supplémentaire, les MEGC partent du constat de l'érosion de l'assiette fiscale afin d'expliquer une dégradation du marché du travail suite à une telle mesure dont le produit serait recyclé par la baisse de l'impôt sur le revenu par exemple. La baisse de la demande de l'énergie en réaction à l'instauration d'une taxe environnementale rétrécit graduellement son assiette fiscale, ce qui fait baisser le montant alloué à l'allègement de l'impôt sur le revenu. Conjuguée avec la montée des prix engendrée par la nouvelle taxe, la baisse tendancielle des montants recyclés affecte négativement les salaires nets des ménages, ce qui accentue leur perte de pouvoir d'achat et les incite à réduire leur offre de travail. Ce dernier effet rétrécit le niveau d'emploi (pour une valeur positive de l'élasticité-salaire de l'offre du travail) et donc la production.

Force est de constater que le raisonnement sous-jacent à ces premiers modèles est d'inspiration idéologique libérale, formalisant avec beaucoup d'élégance mathématique plutôt une situation optimale vers laquelle une économie devrait converger qu'une réalité des systèmes économiques sous-optimaux. Ils ont été par la suite développés et enrichis par des hypothèses plus réalistes sur le fonctionnement de l'économie en tenant en compte de la présence des rigidités réelles et nominales, que ce soit sur le marché du travail (existence du chômage) (Schneider, 1997) ou sur le marché de biens et services (concurrence imparfaite) (Holmlund et Kolm, 1997) (7) afin de permettre l'apparition d'un «double dividende». En parallèle, certains modèles de cette nouvelle génération de MEGC, pour réduire le coût d'une politique environnementale restrictive, tentent de modéliser une boucle rétroactive de l'amélioration de la qualité de l'environnement sur les comportements des ménages et des entreprises (Beaumais et Schubert, 1994, 1999).

4. La modélisation hybride : une autre piste de développement de la modélisation macro-économique appliquée

La modélisation macro-économique ne se réduit pas à une compilation d'équations dans un système binaire figé, qui ne peut prendre que deux formes structurelles prédéterminées et dont les squelettes théoriques

(7) Cette dichotomie au niveau des résultats selon l'approche de modélisation adoptée (keynésienne *versus* walrasienne) a été réfutée par Bosquet B. (2000). Dans son étude, il montre que 75 % des simulations d'une réforme fiscale environnementale à l'aide des modèles macro-économétriques concluent à un effet positif ou nul d'une telle mesure sur l'emploi contre 88 % des simulations faites par des MEGC. Du coup, il affirme que cette divergence des résultats est plutôt due au mode de redistribution des recettes. Néanmoins, cette dichotomie reste valable pour les modèles macro-économiques appliqués à la France.

sous-jacents sont bien rodés et arrêtés. D'autres approches de modélisation se développent constamment dans l'objectif de s'adapter de plus en plus à l'évolution complexe et pluridimensionnelle des systèmes socio-économiques nationaux et au niveau mondial. Elles représentent également un terrain fertile pour confronter les avancées les plus récentes de la recherche fondamentale en économie aux jeux de simulation empirique. Elles s'efforcent ainsi de tester le pouvoir explicatif de telles avancées théoriques confrontées aux comportements réels des agents économiques.

Parmi ces nouvelles approches, un courant de modélisation plus pragmatique se développe ces dernières années, visant à récupérer les avantages des deux modèles standards décrits plus haut et les reformuler dans une même maquette.

Cette nouvelle approche de modélisation dite hybride s'inspire des avancées théoriques connues sous le nom de la «nouvelle synthèse néo-classique», qui consiste à combiner, dans un même cadre analytique, les théories de la croissance de long terme et une représentation des comportements micro-économiques des agents basée sur des programmes d'optimisation inter-temporelle inspirée de la nouvelle macro-économie keynésienne. La dichotomie entre les modèles dits keynésiens et walarsiens dans ces nouveaux modèles hybrides devient floue, et le modélisateur peut recourir à la même maquette pour simuler des chocs de court, moyen et long terme et étudier leur dynamique inter-temporelle.

Un autre apport de ce nouveau courant dans l'analyse de la dynamique des chocs est de pouvoir capter les effets de propagation d'un changement de comportement micro-économique suite à une nouvelle politique publique ou un choc exogène sur les agrégats macro-économiques et inversement. A titre d'illustration, une nouvelle politique publique contraignante, visant à réduire les émissions de CO₂ en renchérissant les prix des énergies fossiles par une taxe environnementale ou par d'autres mesures, altère dans un premier temps les choix micro-économiques des agents, ménages et entreprises qui, par la suite, vont se transmettre aux agrégats macro-économiques. Ce cheminement des effets d'une telle politique est traduit dans ces modèles par des équations agrégeant les comportements des agents, ainsi que par leur capacité d'adaptation et la nature des mesures d'accompagnement. En l'occurrence, dans le cas d'une technologie de production rigide par rapport à l'énergie, d'une part, au moins à court terme, reflétant le caractère complémentaire de cette dernière avec les autres facteurs de production et notamment le capital, et des ménages très sensibles à l'augmentation des prix des énergies fossiles, d'autre part, la dégradation de la situation macro-économique résulte d'un transfert coûteux de l'activité des secteurs énergivores vers des secteurs qui le sont moins. L'importance de ce coût de transaction pendant la période de transition et le délai nécessaire pour s'adapter à la nouvelle situation, et par là l'ampleur d'un tel choc récessif, seraient atténués par la nature du ciblage des

politiques d'accompagnement ou même renversés au cas où les conditions d'apparition du «double dividende» seraient vérifiées.

Les modèles appliqués s'inspirant de cette nouvelle approche (Callonnec *et al.*, 2013; Fougereyrollas *et al.*, 2002; Ghersi *et al.*, 2011; Klein et Simon, 2010) ont en commun certaines propriétés de court terme en lien avec les caractéristiques de la structure des marchés et de leurs fonctionnements, ainsi que de la capacité d'adaptation des agents économiques. A long terme, ces modèles partagent également une situation d'équilibre similaire vers laquelle l'économie tend à converger.

A court terme, les modèles hybrides se caractérisent par une prédominance des mécanismes de la demande dès lors que l'écart de la production par rapport à son niveau de l'état stationnaire est supposé dû à un excès de l'offre. Dans ce cas de figure précis, toute politique publique affectant l'une des composantes de la demande est efficace et permet d'engendrer les effets escomptés de relance, si la mesure est expansionniste, ou récessifs dans le cas inverse. En outre, l'ampleur de la réaction de la demande en général à une politique publique s'amplifie *via* les effets multiplicateur de la consommation privée et accélérateur de l'investissement suite au bouclage macro-économique.

Par ailleurs, les marchés des biens et services ainsi que ceux des facteurs de production sont représentés dans ces modèles sous forme d'une structure en concurrence imparfaite décrivant le pouvoir de marché dont bénéficient certains secteurs, notamment l'industrie et le secteur énergétique intensifs en capital physique. Ce pouvoir de marché se traduit par la fixation des prix à la production à des niveaux supérieurs à ceux d'équilibre en absence de rigidités et en situation de concurrence pure et parfaite. Ces écarts sont modélisés par l'application d'un taux de marge (*mark-up*) au coût unitaire de production. D'autres rigidités nominales sont introduites dans ces modèles en lien avec l'évolution des salaires, qui ne réagissent que partiellement aux tensions sur le marché du travail. Leurs réactions sont plus ou moins étalées dans le temps selon la profondeur de leurs mémoires.

Quant aux rigidités réelles, elles sont introduites dans ces modèles afin de pouvoir reproduire à court terme des écarts de production (*output gap*) négatifs. De ce fait, l'allocation des facteurs de production est supposée sous-optimale, due à la présence des coûts d'ajustement et du chômage involontaire sur respectivement les marchés du capital et du travail. Concrètement, cette situation de sous-optimalité prend la forme d'un écart entre le niveau notionnel ou optimal et effectif dans chacune des fonctions de demande sectorielle des facteurs de production.

Ainsi, la modélisation de l'évolution des variables macro-économiques réelles et nominales permet une déviation de court terme du sentier de croissance optimale dérivant d'une situation d'absence de rigidités et de déséquilibre sur les marchés des biens et services (excès d'offre) et de l'emploi (chômage involontaire).

A l'instar de la structure de court terme, ces modèles appliqués fondés sur la base d'une approche hybride reproduisent également des propriétés communes à long terme. A cet horizon, l'allocation des ressources est supposée optimale, les prix deviennent parfaitement flexibles, et tous les marchés sont donc équilibrés. Du coup, tous les processus d'ajustement sont accomplis et les anticipations sont réalisées : les variables effectives coïncident avec leurs quantités optimales définies par la contrainte de l'offre (la technologie de production).

L'équilibre de long terme est stable et défini dans ce cadre par la théorie de la croissance. Dans le cas d'un progrès technique exogène, l'économie évolue «à la Solow» sur son sentier de croissance équilibré à taux constant déterminé en dehors du modèle. De ce fait, toutes les variables réelles croissent au taux du progrès technique augmenté de celui de la population, les variables par unité de travail efficace sont constantes, et les variables nominales croissent comme les variables réelles plus le taux d'inflation. En revanche, avec une dynamique de croissance endogène, le sentier équilibré s'ajuste aux changements de la politique publique et permet d'améliorer la capacité d'adaptation des agents aux chocs. Ce qui devrait, d'une part, allonger la période du retour à l'équilibre et du coup retarder la fermeture de l'écart de production ainsi qu'ouvrir de nouvelles perspectives de croissance à long terme ; d'autre part, le coût social d'un choc récessif en présence d'un module de croissance endogène se trouve réduit.

Le long terme dans ces modèles est caractérisé par l'absence du dilemme d'arbitrage entre l'inflation et le chômage, du moment où ce dernier atteint son niveau structurel souhaité. Il est caractérisé également par la saturation des contraintes de l'accumulation des flux d'endettement privé et public limitant le stock de la dette à un niveau jugé soutenable.

La phase de transition de l'économie de son état initial de court terme vers sa contrainte finale de long terme est décrite dans ces modèles par plusieurs équations dynamiques souvent de nature récursive (accumulation des stocks, modèles à correction d'erreur, anticipations adaptatives). Quant aux modèles intégrant une dynamique inter-temporelle, ils se font très rares parmi les modèles appliqués à vocation environnementale (Manne *et al.*, 1995), parce qu'ils concluent à des comportements économiques tournés vers le futur (les choix de la période courante vont dépendre des variables de la période courante et de toutes les périodes à venir), ce qui complique la résolution mathématique du système et le rend difficilement manipulable.

En outre, la modélisation hybride est souvent adaptée avec une représentation très détaillée des agents économiques. La désagrégation sectorielle dans ces modèles est de plus en plus fine, et dans certains les ménages sont scindés en plusieurs catégories selon des critères compatibles avec la problématique étudiée. Ce qui devrait, d'une part, permettre la quantification des effets d'entraînement sur l'activité et l'emploi impulsés par la taxe environnementale, dus à des transferts de la valeur ajoutée des secteurs

énergivores vers les secteurs qui le sont moins. Ces effets d'entraînement sont d'autant plus forts que les secteurs moins consommateurs d'énergie fossile sont intensifs en main-œuvre et leur propension à importer faible. Ainsi, les modèles agrégés où ces effets d'entraînement intersectoriels ne sont pas évalués surestiment le coût économique de toute politique environnementale restrictive.

D'autre part, la modélisation des ménages en plusieurs catégories selon leurs revenus et le poids des dépenses énergétiques dans leurs dépenses totales permet d'évaluer les effets redistributifs d'une taxe environnementale et de bien cibler les ménages les plus sensibles à la nouvelle mesure par des politiques d'accompagnement et de recyclage des recettes de la taxe.

Par ailleurs, d'autres pistes de modélisation hybride se développent ces dernières années, bien qu'elles restent encore limitées à un nombre réduit de modèles appliqués, soit en introduisant plus de flexibilité dans les comportements des agents économiques par le recours à des fonctions de production et de consommation dites flexibles (Translog, Cobb-Douglas généralisée, etc.) (Callonnec *et al.*, 2013; Goettle *et al.*, 2007), soit en couplant le modèle macro-économique (*top-down*) avec un module micro-économique d'ingénieur (*bottom-up*) décrivant avec précision le processus de production, notamment en ce qui concerne les différentes technologies de conversion et d'usage de l'énergie (Bosetti *et al.*, 2009; Callonnec *et al.*, 2013; Fougeyrollas *et al.*, 2002; Ghersi *et al.*, 2011; Kypreos, 2007).

Conclusion

En guise de conclusion, il convient de noter que les trajectoires de l'évolution future des économies avec ou sans chocs qui ressortent de ces différentes approches de modélisation macro-économiques n'ont aucun pouvoir prédictif. Elles constituent tout simplement un outil d'aide à la réflexion et de cadrage des interactions entre les sphères économique, énergétique et environnementale au regard des hypothèses identifiées à l'avance et d'une appréhension spécifique des relations de causalité. Ainsi, les enseignements qui en découlent doivent être interprétés à la lumière de ces éléments constitutifs, notamment les hypothèses relatives aux choix des valeurs des élasticités, au traitement du progrès technique (8) et aux projections des variables exogènes (les plus significatives sont le taux de change et le prix du pétrole).

Dès lors, la diversification des approches de modélisation représentent, au moins à nos yeux, un indicateur de la richesse de l'analyse économique. Ces approches sont complémentaires, et chacune d'entre elles se révèle être plus ou moins bien adaptée pour une évaluation des politiques publiques selon le cadre spatial et temporel retenu : les modèles macro-économétriques sont bien placés pour la réalisation des prévisions et des variantes macro-économiques de court terme et dans les pays disposant d'une structure

(8) Le tableau en annexe résume les différentes hypothèses relatives aux choix des valeurs des élasticités de substitution et au traitement du progrès technique dans les principaux modèles macroéconomiques appliqués à des questions énergétiques et environnementales.

statistique ancienne. Tandis que les MEGC sont plus adaptés aux projections de long terme des politiques méso- et macro-économiques et d'évaluation des effets redistributifs du fait de leur maniabilité et de la procédure de paramétrage souvent utilisée (calibration) qui nécessite moins de données que l'estimation économétrique. De ce point de vue, ces derniers sont plus adaptés à la structure statistique des pays en développement.

Quant aux modèles hybrides, malgré les difficultés techniques de couplage de plusieurs modules de dimensions différentes qui restent à surmonter, ils se développent de plus en plus au sein de plusieurs instances de réflexion sur l'évaluation des politiques publiques au détriment des approches traditionnelles, du fait de leur description détaillée des comportements des agents économiques et du besoin croissant des représentations fidèles à la diversité et la complexité des systèmes économiques.

Références

- BARKER T., *et al.* (1993), « A UK Carbon/Energy Tax. The Macroeconomic Effects », *Energy Policy*, n° 21(3).
- BEAUMAIS O., GODARD O. (1994), « Economie, croissance et environnement: de nouvelles stratégies pour de nouvelles relations », *Revue économique*, hors série « Perspectives et réflexions stratégiques à moyen terme ».
- BEAUMAIS O., SCHUBERT K. (1994), « Equilibre général appliqué et environnement: de nouveaux comportements pour le consommateur et le producteur », *Revue économique*, n° 45(3).
- BEAUMAIS O., SCHUBERT K. (1999), « La modélisation en équilibre général calculable: un regard sur les interactions économie-environnement », *Economie rurale*, n° 251.
- BEAUMAIS O., ZAGAMÉ P. (1993), « Economic Models for Analysing Environmental Problems », in *The European Carbon Tax: an Economic Assessment*, Carraro et Siniscalco, Kluwer Academic Publishers.
- BERNARD A., VIELLE M. (1995), « A General Equilibrium Model of International National Interaction for Economy – Energy – Environment », *Commissariat à l'énergie atomique*.
- BERNARD A., VIELLE M. (2008a), « GEMINI-E3, a General Equilibrium Model of International et National Interactions between Economy, Energy et the Environment », *Computational Management Science*, n° 5(3).
- BERNARD A., VIELLE M. (2008b), « Résultats des simulations réalisées avec le modèle GEMINI-E3 pour la Commission du CAS chargée de la détermination de la valeur carbone », *Conseil d'analyse stratégique*.
- BILS M. (1987), « The Cyclical Behaviour of Marginal Cost et Price », *American Economic Review*, n° 77.
- BOSETTI V., TAVONI M., DE CIAN E., SGOBBI A. (2009), « The 2008 WITCH Model: New Model Features and Baseline », *Fondazione Eni Enrico Mattei*, Working Paper, n° 85.
- BOSQUET B. (2000), « Environmental Tax Reform: Does It Work? a Survey of the Empirical Evidence », *Ecological Economics*, n° 34.
- BOVENBERG A.L., DE MOOIJ R.A. (1994a), « Environmental Levies et Distortionary Taxation », *American Economic Review*, n° 84(4).
- BOVENBERG A.L., DE MOOIJ R.A. (1994b), « Environmental Taxes et Labor-Market

- Distortions», *European Journal of Political Economy*, n° 10.
- BOVENBERG A.L., VAN DER PLOEG F. (1994a), «Environmental Policy, Public Finance et the Labor Market in a Second-Best World», *Journal of Public Economics*, n° 55(3).
- BOVENBERG A.L., VAN DER PLOEG F. (1994b), «Environmental Policy, Public Goods et the Marginal Cost of Public Funds», *The Economic Journal*, n° 104.
- BRÉCHET T. (1999), «SPOT: un modèle d'équilibre général appliqué de l'économie belge», *Bureau Fédéral du Plan*, Belgique.
- BURNIAUX J.M., NICOLETTI G., OLIVIERA-MARTINS J. (1992), «GREEN, A Multi-sector, Multi-region General Equilibrium Model For Quantifying the Costs of Curbing CO₂ Emissions: Technical Manual», *Working Paper OECD*, n° 116.
- CALLONNEC G., REYNÈS F., TAMSAMANI Y.Y. (2011), «Presentation of the Three-ME model: Multi-sector Macroeconomic Model for the Evaluation of Environmental and Energy policy», *Document de travail de l'OFCE*, n° 2011-10.
- CALLONNEC G., REYNÈS F., TAMSAMANI Y.Y. (2012), «Une évaluation macro-économique et sectorielle de la fiscalité carbone en France», in LAURENT E., *Economie du développement soutenable*.
- CALLONNEC G., LANDA G., MALLIET P., REYNÈS F., TAMSAMANI Y.Y. (2013), «A full description of the Three-ME model: Multi-sector Macroeconomic Model for the Evaluation of Environmental and Energy policy», *Document de travail de l'OFCE*.
- CGP (Commissariat général au plan) (1993), *l'Economie face à l'écologie*, édition la Découverte de la Documentation française.
- CAPROS P., et al. (2010), «The GEM-3E Model: Référence Manuel», http://erasme-team.eu/files/Manual_GEM-E3.pdf
- CHIROLEU-ASSOULINE M. (2001), «Le double dividende: les approches théoriques», *Revue française d'économie*, n° 16(2).
- CRASSOUS R., QUIRION P., GHERSI F., COMBET E. (2009), «Taxe carbone, recyclage des recettes et double dividende», *Références économiques pour le développement durable*, n° 4.
- DETEMMERMAN V., et al. (1993), «Increase on Energy Taxes as a way to Reduce CO₂ Emissions: Problems et Mechanism», in LESOURD J.B., PERCEBOIS J., VALETTE F., *Models for Energy Policy*, Chapman et Hill.
- DGII (1992), «The Economics of Limiting CO₂ Emissions», édition spéciale de *European Economy*, commission des communautés européennes, bureau des publications officielles, Luxembourg.
- EPAULARD A. (1997) «Les modèles appliqués de la macro-économie», *les Topos*, édition Dunod, Paris.
- FOUGEYROLLAS A., LE MOUEL P., ZAGAMÉ P., BOSSIER F., THIERY F. (2002) «The NEMESIS Model: New Econometric Model for Environment et Sustainable Development Implementation Strategies», *Policy Modeling International Conference (ECOMOD) Brussels*, July 4-6.
- GHERSI F., THUBIN C., COMBET E. (2011), «Le Modèle IMACLIM-S», *Centre international de recherche sur l'environnement et le développement*.
- GIEC (2001), «Climate Change 2001: Mitigation», Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), BERT Metz, OGUNLADE Davidson, ROB Swart, JIAHUA Pan (éd.), Cambridge University Press, UK.
- GODARD O. (2001), «L'expertise économique du changement climatique planétaire. 1. Modèles d'organisation de l'expertise. 2. Sur la scène internationale, le GIEC. 3. Sur la scène française, autour du Commissariat

- général au plan», *Annales des Mines*, série «Responsabilité et environnement», n° 21.
- GODARD O. (2007), «Pour une morale de la modélisation économique des enjeux climatiques en contexte d'expertise», in *les Modèles du futur*, sous la direction de Amy DAHAN DALMEDICO, édition la Découverte, Paris.
- GOETTLE R.J., HO M.S., JORGENSON D.W., SLESNICK D.T., WILCOXEN P.J. (2007), «IGEM, an Inter-temporal General Equilibrium Model of the U.S. Economy with Emphasis on Growth, Energy and the Environment», *U.S. Environmental Protection Agency* (EPA).
- GOULDER L.H. (1995), «Environmental Taxation and the Double-Dividend: A Reader's Guide», *International Tax and Public Finance*, n° 2.
- HOLMLUND B., KOLM A.S. (1997), «Environmental Tax Reform in a Small Open Economy With Structural Unemployment», *Working Paper*, Department of Economics, Uppsala University.
- JACOBY H.D., REILLY J.M., MCFARLAND J.R., PALTSEV S. (2006), «Technology and Technical Change in the MIT EPPA Model», *Energy Economics*, n° 28.
- KLEIN C., SIMON O. (2010), «Le modèle MESANGE: nouvelle version réestimée en base 2000», *les Cahiers de la DGTPE*, n° 2.
- KYPREOS S. (2007), «A Merge model with endogenous technological change and the cost of carbon stabilization», *Energy Policy*, n° 35.
- LAURENT E. (2009), «Ecologie et inégalité», *Revue de l'OFCE*, n° 120.
- MANNE A., MENDELSON R., RICHEL R. (1995), «MERGE: A model for evaluating regional and global effects of GHG reduction policies», *Energy Policy*, n° 23(1).
- MARTINS J.O., SCARPETTA S. (2002), «Estimation du comportement cyclique des taux de marge: une note technique», *Revue économique de l'OCDE*, n° 34(1).
- PALTSEV S., JOHN M. REILLY, Henry D. JACOBY, RICHARD S., MCFARLAND ECKAUS J., SAROFIM M., ASADOORIAN M., BABIKER M. (2005), «The MIT Emissions Prediction and Policy Analysis (EPPA) Model: Version 4», *MIT Report* 125.
- PIGOU A.C. (1920), «The Economics of Welfare», Macmillan, Londres.
- ROTEMBERG J., WOODFORD M. (1991), «Markups and the Business Cycle», *Macroeconomic Annual*, NBER.
- SCHNEIDER K. (1997), «Involuntary Unemployment and Environmental Policy: The Double Dividend Hypothesis», *Scandinavian Journal of Economics*, n° 99(1)
- SHACKLETON R., MICHAEL SHELBY A., BRINNER C.R., YANCHAR J., GOULDER L., JORGENSEN D., WILCOXEN P., PAULY P., KAUFMANN R. (1993), «The Efficiency Value of Carbon Tax Revenues», Working Paper 12.8, *Energy Modeling Forum*, Stanford University.
- STERN N.H. (2006), «The Economics of Climate Change: The Stern Review», *Great Britain Treasury*, Cambridge University Press.
- VIELLE M. (1998), «Un outil destiné à l'étude des impacts industriels des politiques énergétiques et environnementales», <http://gemini-e3.epfl.ch/webdav/site/gemini-e3/shared/GEMINI-E3XLFrance.pdf>

Annexe

Auteur(s)	Modèle	Type de modèle	Champs d'application (4)	Technologie de production (5)	Elasticités de substitution (6)	Progrès technique (PT) favorable à l'énergie et à l'environnement
Paltsev <i>et al.</i> , 2005 ; Jacoby <i>et al.</i> , 2006	MIT EPPA	MEGC (2)	MR, MS	CES imbriquée, putty/putty	$\delta m, (k e)=0, \delta e, (k l)=0.5; \delta k, l=1; \delta(fe), (ee)=0.5; \delta fei=1$	AAEE (8) croissante dans le temps ; « backstop technology » endogène
Fougeurolas <i>et al.</i> , 2002	NEMESIS	Macro-économétrique hybride (1)	MR, MS	CES imbriquée ; putty/semi-putty	$\delta m, (k sl e)=0; \delta sl, (k ule)=ng; \delta ul, ke=ng; \delta k, e=0; \delta el=0.5$	PT endogène (accumulation du stock des connaissances)
Burniaux <i>et al.</i> , 1992	GREEN	MEGC	MR, MS	CES imbriquée ; putty/semi-putty	$\delta m, (k e)=0, \delta l, (ke)=1; \delta k, e=0.8; \delta el=2$	AAEE (8) ; « backstop technology »
Capros <i>et al.</i> , 2010	GEM 3E	MEGC	MR, MS	CES imbriquée ; putty/putty	$\delta k, (l me)=0.4; \delta ee, (l mf e)=0.5; \delta l, m, fe=0.3 (7); \delta fei=0.6 (7)$	Technologie « End-of-Pipe »
Manne <i>et al.</i> , 1995 ; Kypros, 2007	MERGE	MEGC hybride (1)	MR, MS	CES imbriquée ; putty/putty	$\delta e, (k l)=0.5; \delta k, l=1$	AAEE (8) ; PT endogène (apprentissage par la pratique)
Bréchet, 1999	SPOT	MEGC	BE, MS	CES imbriquée ; putty/putty	$\delta(ek), sl=[0.4-0.7]; \delta(ek), ls=[0.75-0.85]; \delta k, e=[0.3-0.45]$	
Bernard, 1995	GEMINI-E (3)	MEGC	MR, MS	CES imbriquée ; putty/putty	$\delta e, k, l, m=[0.3-0.5]; \delta el=0.3$	
Vielle, 1998	GEMINI-E (3) XL France	MEGC	FR, MS	CES imbriquée ; putty/putty	$\delta(eefekl), m=0.2; \delta ee, fe, (k l)=0.6; \delta k, l=0.8; \delta fei=0.8$	
Bernard et Vielle, 2008	GEMINI-E (3)	MEGC	MR, MS	CES imbriquée ; putty/putty	$\delta ee, ef, k, l, m=0.1; \delta fe, re=0.9; \delta efi=0.9$	AAEE (8) ; er (6)
Gherzi <i>et al.</i> , 2011	IMACLIM-S	Modèle hybride (3)	FR, MS	CES, putty-clay	$\delta k, l, e, mi=0.6$	PT endogène neutre au sens de Hicks ; PT endogène dans la structure Bottom-up
Klein et Simon, 2010	MESANGE	Macro-économétrique	FR, MS	CES imbriquée, putty-putty	$\delta(k l), e=0.4; \delta k, l=0.5$	
Bosetti <i>et al.</i> , 2009	WITCH	MEGC hybride (1)	MR, MS	CES imbriquée, putty-putty	$\delta(k l), (k^*e)=0.5; \delta k, l=1; \delta k^*, e=1.6; \delta fe, ee=0.5; \delta efi=0.5$	« Backstop technology » ; PT endogène (apprentissage par la pratique et par la recherche)

(1) Couple avec une structure détaillant les technologies de production de l'énergie.

(2) Modèles d'équilibre général calculable.

(3) IMACLIM est un « top-down » MEGC enrichi par un « bottom-up » module de production de l'énergie, en intégrant certaines propriétés de la macroéconomie néo-keynesienne.

(4) MR=Multi-régional, MS=Multi-sectoriel, FR=France, BE=Belgique.

(5) L'hypothèse d'une technologie de production Putty/semi-Putty (ou clay) signifie que les élasticités de substitution factorielle prennent des valeurs plus faibles (ou nulles) avec le stock de capital physique déjà installé.

(6) δ_i, i' = élasticité de substitution entre i et i' ; (j) = facteur de production composite à chaque nœud de la structure de production; k =Capital; l =travail qualifié; ul =travail non qualifié; e =énergie agrégée; ee =électricité; fe =énergie fossile; er =nucléaire et énergie renouvelable; k^* =stock de R&D dans le secteur de l'énergie.

(7) Ces élasticités sont plus élevées dans les secteurs intensifs en énergie ($\delta l, m, ef=0.5; \delta ef=0.9$) et moins élevées dans les secteurs producteurs de l'énergie outre le secteur d'électricité ($\delta l, m, ef=0.1; \delta ef=0.1$).

(8) AAEE=Amélioration autonome de l'efficacité énergétique.