

Document de travail n°48

**Une grille d'analyse des évaluations
des impacts macroéconomiques
de la transition énergétique**



Coe-Rexecode

MAI 2014

Ce document de travail a été réalisé par



avec
**Jean-François
OUVRARD**

Directeur des études au sein Coe-Rexecode, il est en charge des travaux portant notamment sur la politique économique, la compétitivité, l'emploi et la croissance. Il a rejoint Coe-Rexecode en 2013.

Il était auparavant en charge du diagnostic conjoncturel à l'Insee après avoir occupé différents postes d'économistes au sein de la Direction Générale du Trésor. Il est diplômé de l'Ecole Polytechnique, de l'ENSAE et titulaire d'un DEA de macroéconomie de l'Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne.



**Pascale
SCAPECCHI**

Pascale Scapecchi est docteur en économie de l'Université de la Méditerranée (Aix-Marseille II). Avant de rejoindre Coe-Rexecode en 2012, elle a été économiste à la Direction de l'environnement de l'OCDE puis à la Direction générale du Trésor du Ministère de l'économie, des finances et de l'industrie. Spécialisée en économie publique, ses travaux récents portent sur les aspects économiques du changement climatique. Au sein du pôle Etudes de Coe-Rexecode, Pascale Scapecchi est chargée de travaux de politique économique et plus précisément des questions relatives à l'énergie et à l'environnement.



Coe-Rexecode

Michel DIDIER, président ; Jean-Michel BOUSSEMARY, délégué général ; Denis FERRAND, directeur général, directeur de la conjoncture et des perspectives ; Jean-François OUVRARD, directeur des études

CONSEIL D'ADMINISTRATION

Michel DIDIER, Président ; Pierre-Antoine GAILLY, co-Président ; Jacques-Henri DAVID, Président d'honneur ; Gérard WORMS, Président d'honneur ; Michel CICUREL, Vice-président ; Pierre GADONNEIX, Vice-président ; Antoine GENDRY, Trésorier
Administrateurs : Hervé BACULARD, Patricia BARBIZET, Philippe CITERNE, Martine CLEMENT, Jean DESAZARS de MONTGAILHARD, Jean-Pierre DUPRIEU, Jérôme FRANTZ, Michel GUILBAUD, Anne-Marie IDRAC, Philippe LAMOUREUX, Raymond LEBAN, Vivien LEVY-GARBOUA, Gilles de MARGERIE, Nicolas MOREAU, Gervais PELLISSIER, Jean-François PILLIARD, Vincent REMAY, Didier RIDORET, Geoffroy ROUX de BEZIEUX, Geneviève ROY, Frédéric SAINT-GEOURS, Jean-Charles SAVIGNAC, Pierre TROUILLET, Bruno WEYMULLER

Une grille d'analyse des évaluations des impacts macroéconomiques de la transition énergétique

Introduction	5
Quels sont les outils utilisés pour évaluer les impacts économiques de la transition énergétique ?	5
Une grande diversité d'évaluations des impacts macroéconomiques	5
Les modèles technico-économiques	7
Les modèles macroéconométriques	8
Les modèles d'équilibre général calculable	9
Les modèles hybrides	9
Grille de lecture des modélisations de la transition énergétique : quelques principes	10
Premier canal : les instruments de prix	12
Canaux de transmission d'une taxe carbone	12
Les possibilités de substitution technologique jouent un rôle essentiel	14
La possibilité du « double dividende »	15
Deuxième canal : les soutiens de la demande	16
Le rôle de l'investissement	17
Prendre en compte le financement de l'investissement	18
Le progrès technique est un facteur-clé	19
Le rôle du progrès technique sur la croissance	19
Progrès technique exogène vs. endogène	20
Le bouclage macroéconomique conditionne l'équilibre atteint	21
La compréhension des mécanismes de bouclage des modèles est essentielle ...	21
L'analyse du scénario de référence doit être faite	22
La grille de lecture appliquée aux scénarios de la transition énergétique : pourquoi les études donnent ces résultats ?	24
Forces et faiblesses des différentes familles de modèles	24
Lecture critique des scénarios récents de transition énergétique	24
Recommandations	25
Notes	28

Une grille d'analyse des évaluations des impacts macroéconomiques de la transition énergétique

La politique de transition énergétique vise à infléchir la trajectoire de l'économie française afin de diminuer les émissions de gaz à effet de serre par rapport à son évolution spontanée.

Cette politique peut mettre en œuvre plusieurs instruments : une taxation des émissions de carbone afin d'internaliser dans le prix de revient le coût social des émissions, des quotas d'émissions pour limiter directement les quantités émises (accompagnés d'un marché d'échange), des incitations budgétaires par des subventions ou des crédits d'impôt...

Quel que soit le scénario privilégié, les mesures de politique retenues auront pour conséquence (recherchée) de modifier les équilibres macroéconomiques futurs. Les études de transition énergétique sont donc souvent accompagnées d'une évaluation des conséquences macroéconomiques, c'est-à-dire sur le niveau du PIB, l'emploi, le pouvoir d'achat, à plusieurs horizons afin de pouvoir comparer les impacts (environnementaux notamment) et les coûts économiques éventuels des scénarios. Les évaluations sont présentées en différence par rapport à un « compte central » censé représenter l'avenir sans la politique envisagée.

L'estimation des conséquences des politiques (c'est-à-dire des écarts avec le compte central) repose sur différentes méthodes qui s'efforcent de prendre en compte les relations entre l'ensemble des variables économiques. Compte tenu de la complexité de l'économie, les projections font appel à des modèles macroéconomiques.

L'objet de notre étude est de comparer les principaux modèles macroéconomiques disponibles et de préciser autant que possible leurs domaines et leurs limites de validité pour éclairer les effets des politiques de transition énergétique. Cette analyse est d'autant plus nécessaire que, dans les études publiques actuelles, les effets économiques censés accompagnés des scénarios similaires en matière de politique de transition énergétique sont très différents, voire contradictoires. Ainsi par exemple, dans les travaux du Comité Trajectoires, un scénario visant une réduction des émissions de gaz à effet de serre de 30% en 2030 par rapport à 1990 qui mettrait en place une taxe carbone pour atteindre cet objectif et recyclerait les recettes de la taxe sous forme de baisse des cotisations sociales patronales conduirait en 2030 à une hausse du PIB de 0,6% (par rapport à son niveau dans le compte central) selon le modèle macroéconométrique « néo-keynésien » Mesange mais à une baisse du PIB de 4,5% selon le modèle d'« équilibre général hybride » Imacim-R. Ces différences ne tiennent pas tant aux scénarios de transition énergétique proposés qu'aux outils d'analyse mobilisés.

Notre travail ne porte aucun jugement sur les politiques de transition énergétique. Il est centré sur la nature, les références théoriques et les propriétés des différents modèles macroéconomiques.

On distingue traditionnellement les modèles d'équilibre partiel et les modèles d'équilibre général. Les premiers s'intéressent en détail à un secteur économique, par exemple le secteur de la production d'électricité, toutes choses égales par ailleurs. Ils peuvent apporter un éclairage très utile sur une branche, une activité économique mais pas sur l'équilibre global. C'est pourquoi nous ne les examinerons pas dans ce document de travail.

Les modèles macroéconomiques sont censés prendre en compte l'ensemble des relations qui conduisent à la formation des équilibres successifs qui créent la dynamique économique. Leur structure se réfère à deux grands courants théoriques de pensée : la théorie keynésienne et la théorie néo-classique. Notre étude porte plus particulièrement sur 5 modèles de ce genre utilisés en France dans le domaine de l'énergie et du climat, et sur 4 exercices récents menés en France qui proposent des scénarios de transition énergétique : 1) l'étude du Trésor publiée en décembre 2010 ; 2) le scénario de Greenpeace publié en janvier 2013 ; 3) les scénarios de l'ADEME publiés en avril 2013 ; 4) les travaux du Comité « Trajectoires 2020-2050 vers une économie sobre en carbone » publiés en 2012 par le Centre d'analyse stratégique.

Notre travail examine l'impact de deux catégories d'instruments de politique (les instruments visant à modifier les prix et les instruments d'incitation budgétaire), ainsi que le rôle de la modélisation retenue du progrès technique et du bouclage macroéconomique du modèle dans les évaluations. Ce constat conduit à 8 recommandations aux utilisateurs des études d'impact macroéconomique de la transition énergétique :

1. Evaluer les effets nets des scénarios de transition énergétique sur l'économie à partir de modèles présentant un bouclage macroéconomique, pour prendre en compte l'ensemble des interactions entre les variables affectant l'équilibre économique.
2. Expliciter le scénario de référence (i.e. le compte central) du modèle puisque les impacts macroéconomiques sont estimés en écart à ce scénario.
3. Rendre publiques des variantes stylisées du scénario central pour comprendre les mécanismes du modèle à paramètres énergétiques inchangés.
4. Expliciter le financement des mesures envisagées, afin d'assurer la vraisemblance de la politique de transition énergétique.
5. Considérer la chronologie des impacts sur une période aussi longue que possible au lieu de se focaliser sur les effets à une date précise (e.g. à 2030, à 2050) pour apprécier les effets transitoires et les délais d'ajustement.
6. Evaluer les effets de la transition énergétique sur l'ensemble des canaux de la compétitivité, en les intégrant dans le scénario de référence.
7. Ne pas ignorer les interactions entre économie et environnement.
8. Mobiliser des modèles de natures différentes pour distinguer les effets économiques liés au modèle et ceux qui sont liés à la politique de transition énergétique.

Aucune des études considérées dans ce travail et dans le débat national sur la transition énergétique ne satisfait ces 8 recommandations. Par exemple, le scénario de Greenpeace propose une évaluation des emplois directs créés dans les secteurs de l'électricité et de la chaleur uniquement sans évaluer l'effet net sur l'économie. L'étude de l'Ademe ne présente pas la chronologie des impacts pour apprécier les effets de transition et ceux de long terme. D'une manière générale, dans toutes les études, le scénario de référence est peu explicité et les mécanismes macroéconomiques des modèles peu renseignés (à l'exception du modèle Mesange dont certaines variantes sont publiques). Enfin, seuls les travaux du Comité « Trajectoires » parmi les 4 études examinées ici reposent sur des modèles de natures différentes.

Les évaluations des impacts macroéconomiques actuellement avancées pour justifier la mise en œuvre d'une politique de transition énergétique présentent des limites évidentes qu'il convient de combler afin de maximiser les bénéfices (environnementaux et économiques) de cette politique tout en limitant le coût économique et social.

Introduction

La transition énergétique est de nouveau à l'agenda politique cette année avec une loi de programmation qui devrait être présentée d'ici l'été. Il sera question notamment de déterminer le futur mix énergétique, de fixer des objectifs de production d'électricité décarbonée, d'identifier les instruments à mettre en œuvre pour financer la transition de notre économie vers un fonctionnement plus sobre en énergie et en carbone. Cette loi de programmation de la transition énergétique est décisive et il paraît nécessaire qu'elle soit fondée sur la plus large connaissance possible, en particulier sur les impacts économiques que les mesures qu'elle va introduire pourraient avoir à court, moyen et long termes.

Dans cette perspective, des études d'impacts de scénarios de transition énergétique précisant les instruments de politique à mobiliser sont régulièrement publiés par divers organismes, publics ou privés. Ces évaluations couvrent un large spectre d'objectifs, d'instruments, de scénarios et s'appuient sur des « modèles » de nature souvent très différente. Elles sont difficilement comparables. Leurs résultats sont cependant souvent mis en avant sans être analysés en profondeur au risque d'être mal interprétés et utilisés.

L'objet de notre étude est de proposer un cadre d'analyse des scénarios de transition énergétique fondé sur une grille de lecture commune des différents modèles utilisés. Plus précisément, la transmission du choc propagé par la transition énergétique sur l'économie est examinée afin d'identifier les canaux de diffusion propres à chaque catégorie de modèles.

Dans une première partie, nous rappelons les différents types de modèles économiques employés pour évaluer les effets macroéconomiques de la transition énergétique. Les mécanismes économiques sous-jacents qui expliquent les divergences de résultats entre études et entre modèles sont

ensuite examinés. Au regard des politiques mises en œuvre pour la transition énergétique, quatre éléments doivent faire l'objet d'un examen attentif :

- Les instruments prix ;
- Les dispositifs de soutien à la demande ;
- Le progrès technique ;
- Le bouclage macroéconomique.

Notre travail montre ensuite que la connaissance des mécanismes de modélisation aide à comprendre les estimations émanant des scénarios de transition énergétique les plus récents. Enfin, des recommandations relatives à l'utilisation de la modélisation macroéconomique pour l'évaluation de la transition énergétique sont proposées en conclusion de l'étude.

Quels sont les outils utilisés pour évaluer les impacts économiques de la transition énergétique ?

L'analyse économique est évidemment indispensable pour estimer les coûts de politiques visant à réduire ou à limiter les impacts du changement climatique, afin d'éclairer la prise de décision.

Une grande diversité d'évaluations des impacts macroéconomiques

Ce document s'intéresse aux évaluations « macroéconomiques » de la transition énergétique, c'est-à-dire aux travaux qui se donnent pour objectif d'intégrer l'ensemble des politiques et objectifs associés à la transition énergétique dans un cadre unique, pour en déterminer les conséquences sur l'économie (croissance, chômage, *etc.*). Pour la France, quatre exercices récents proposent des scénarios de transition énergétique avec une évaluation des impacts macroéconomiques (exprimés en termes d'effets sur le PIB et/ou sur l'emploi)¹ :

Principaux résultats des études choisies				
	DG Trésor	Greenpeace	Ademe	Comité Trajectoires
Horizon(s)	2050	2050	2050	2050
Modèles utilisés	Mesange	Aucun	Threeme	Poles, Mesange, Threeme, Nemesis et Imaclim-R
Demande d'énergie finale	Non chiffrée	-54% par rapport à 2011	-34% par rapport à 2010	Non chiffrée
Développement ENR	23% de la consommation énergétique en 2020	84% de l'énergie primaire en 2050	55% de l'énergie primaire en 2050	Non chiffrée
Emissions CO ₂	-14% par rapport à 1990 en 2020	-95% par rapport à 1990 en 2050	-74% par rapport à 1990 en 2050	-75% par rapport à 1990 en 2050
Taxe carbone	Non	Oui	Oui	Oui
Impacts sur le PIB	+0,4% après un an +1,9% après 5 ans +0,8% après 10 ans	Non chiffrés	+1,9% en 2030 ; +2,7% en 2050	Mesange : de -0,5 à +1,2% en 2030 Threeme : de +0,2 à 13,4% en 2030 Nemesis : de 0 à +1,4% en 2030 Imaclim : de -2 à -7% en 2030
Impacts sur l'emploi	Effet négatif à long terme +250 000 emplois après 10 ans Effet négatif à long terme	+42300 postes dans les ENR +2100 postes dans les combustibles fossiles -3300 postes dans nucléaire Total : + 41 200 emplois d'ici 2020	+ 329 000 postes en 2030 (cumulés) ; + 825 000 postes en 2050 (cumulés)	Mesange : de -78000 à +168000 en 2030 Threeme : de +0,1% à +6,4% en 2030 Nemesis : de +46000 à 131 000 en 2030
Nature effets emploi	Emplois nets	Emplois bruts	Emplois nets	Emplois nets

- l'étude de la Direction générale du Trésor publiée en décembre 2010² ;
 - le scénario de Greenpeace publié en janvier 2013³ ;
 - les scénarios de l'ADEME publiés en octobre 2013⁴ ;
 - les travaux du Comité « Trajectoires 2020-2050 vers une économie sobre en carbone » publiés en 2012 par le Centre d'analyse stratégique⁵.
- les modèles technico-économiques : construits en équilibre partiel, ils permettent une analyse détaillée des opportunités technologiques (e.g. Poles) ;
 - les modèles macroéconométriques (e.g. Mésange, Nemesis, Threeme) : généralement de type néo-keynésiens, ils reposent sur des estimations économétriques des comportements des agents économiques, notamment leurs anticipations ;

Le tableau ci-contre résume les principaux résultats de ces quatre études. Pour donner une mesure des coûts ou des bénéfices de la transition énergétique, les effets sont évalués en écart à un scénario de référence n'incluant pas de mesures de transition énergétique⁶. Il apparaît une dispersion et une hétérogénéité très marquée des effets macroéconomiques attendus. Ces différences ne tiennent pas tant aux objectifs de réduction des émissions de CO₂ poursuivis qu'aux outils d'analyse mobilisés. Cela s'observe directement à partir des résultats du Comité Trajectoires qui soulignent bien le fait que, pour un même scénario de réduction des émissions de CO₂, les évaluations des impacts macroéconomiques sont assez différentes selon le modèle utilisé.

L'étude de Greenpeace se distingue des autres car c'est la seule à ne pas évaluer les effets nets de son scénario de transition énergétique sur l'emploi (et sur la croissance du PIB). Elle se limite à évaluer les emplois bruts, c'est-à-dire les emplois qui seraient créés dans la filière par le scénario, sans prendre en compte les emplois qui seraient perdus dans les autres secteurs de l'économie. Cette approche est clairement limitée et ne paraît pas appropriée pour éclairer la prise de décision. Il faut autant que possible privilégier les évaluations des effets nets que peuvent effectuer les modèles macroéconométriques et les modèles d'équilibre général.

Les modèles utilisés pour produire ces scénarios s'inscrivent dans quatre grandes « familles » de modèles de la littérature économique :

- les modèles d'équilibre général (e.g. Gemini-E3) : fondés sur la théorie économique de l'équilibre général, ils décrivent, pour chaque facteur de production et chaque produit, l'équilibre de l'offre et de la demande obtenu par l'ajustement du système de prix ;
- les modèles hybrides (e.g. Imaclim-R) : ils combinent un module macroéconomique (de type équilibre général pour Imaclim-R) à un module technologique très détaillé construit sur une approche « microéconomique » des opportunités technologiques.

Les modèles technico-économiques

Les modèles technico-économiques (dits *bottom-up*) sont des modèles d'équilibre partiel qui formalisent les contraintes et opportunités technologiques. Ils cherchent ainsi à identifier les comportements sectoriels portant sur l'offre et la demande détaillées de certains facteurs de production, ceci dans le but d'estimer les coûts totaux et marginaux d'abattement⁷, les prix des facteurs et les possibilités de mesures sans regret⁸. Ils s'appuient pour cela sur une description technologique détaillée des filières de chaque industrie, des passerelles technologiques entre elles et des attributs des équipements (rendement, capacités, structures de coûts, impacts) et de la concurrence entre secteurs au stade des besoins (Rapport Finon, 2003)⁹. Le cadre de ces modèles est généralement national (e.g. Markal)¹⁰, même si certains fournissent des analyses internationales (e.g. Poles)¹¹.

Sachant qu'il existe différents modes de productions concurrentiels faisant appel à des technologies différentes, ces modèles permettent d'identifier les technologies les plus efficaces à partir des coûts de production, des prix des énergies, des taux de pénétration des technologies sur le marché, *etc.* L'approche s'inscrit clairement dans une perspective de coût-efficacité. Ces modèles sont employés pour identifier les combinaisons technologiques les moins coûteuses pour atteindre un certain niveau de demande finale. Ils ont ainsi permis d'identifier l'existence de possibilités d'investissement rentables et non-exploitées, qualifiées de potentiels de réduction des émissions à coût négatif.

Les modèles *bottom-up* permettent de construire, entre autres, des trajectoires d'offre et de demande d'énergie, de prix des énergies, ou de coûts de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Cependant, ils ne comportent pas de module permettant une rétroaction macroéconomique. Les résultats obtenus par ces modèles sont donc souvent utilisés comme inputs aux modèles *top down* (modèles macroéconométriques, modèles d'équilibre général calculable – *cf. infra*) qui disposent d'un bouclage macroéconomique. C'était notamment la démarche retenue pour les travaux du Comité Trajectoires en 2012 avec le modèle Poles.

Ces modèles ne font pas l'objet d'un examen approfondi dans cette étude qui se concentre sur les modèles proposant un bouclage macroéconomique.

Les modèles macroéconométriques

Les modèles macroéconométriques ont été initialement conçus pour évaluer les impacts macroéconomiques et sectoriels des politiques économiques et sont largement utilisés comme outil d'aide à la décision politique. Ils sont généralement utilisés pour simuler et évaluer les effets de chocs économiques ou pour faire des prévisions macroéconomiques à court ou moyen terme.

Ces modèles reposent sur un jeu d'équations décrivant l'ensemble de l'économie, les comportements des agents et des marchés. Ils peuvent contenir des centaines voire des milliers d'équations décrivant l'évolution des principaux agrégats économiques. Ces modèles s'appuient sur un cadre théorique décrivant les équilibres macroéconomiques (chômage d'équilibre, boucle prix-salaire, *etc.*). A partir de ce cadre théorique, l'approche est ensuite très empirique, avec des estimations économétriques d'équations de comportement. Ces modèles sont par nature dynamiques et permettent d'introduire des imperfections des marchés, ou encore des coûts d'ajustement de court terme suite à des changements de politique publique.

Le recours à l'économétrie confère à ces modèles une assise empirique importante : toutes les fonctions de comportement sont, en principe, validées en fonction des comportements historiques. Cette force constitue également une faiblesse car elle entretient une dépendance entre comportements présents et passés et, par définition, ces modèles sont inopérants pour détecter des ruptures de tendance. En outre, le recours à l'économétrie nécessite une quantité importante de données, ce qui a pour contrepartie un degré de désagrégation sectorielle souvent plus faible que dans les modèles d'équilibre général calculable.

Trois modèles macroéconométriques ont été utilisées pour évaluer les impacts macroéconomiques des scénarios envisagés par le Comité Trajectoires : Nemesis¹², Threeme¹³ et Mesange¹⁴. Le modèle Threeme est également utilisé pour modéliser l'impact macroéconomique des scénarios de transition énergétique proposés par l'ADEME que nous examinerons également ultérieurement.

D'autres modèles macroéconométriques ont été appliqués au domaine des changements climatiques. On peut citer par exemple le GMM (*Global Macroeconomic Model*) développé par Oxford Economics Forecasting. Ce modèle a été notamment employé pour explorer l'impact d'une variation des prix de l'énergie sur l'économie britannique¹⁵.

Les modèles d'équilibre général calculable

Les modèles d'équilibre général calculable (MEGC) reposent sur la théorie macroéconomique de l'équilibre général, fondée sur les comportements microéconomiques du consommateur et du producteur. Ils décrivent explicitement les préférences des consommateurs et les possibilités techniques de substitution à travers des agents représentatifs. Ainsi, les consommateurs et les producteurs allouent leurs ressources de manière à maximiser respectivement leur bien-être (utilité) et leurs profits. L'équilibre est atteint au travers d'ajustements dans les prix relatifs qui sont déterminés par le modèle.

En décrivant les interactions entre les différents secteurs de l'économie, ces modèles reconnaissent non seulement les effets directs d'une politique donnée sur les entreprises et les ménages, mais également les effets indirects d'équilibre général. Ils peuvent donc reproduire une économie à l'équilibre sur la base d'ajustements par les prix et les quantités. Ces modèles sont plutôt destinés à l'analyse structurelle afin d'évaluer les effets tendancielles en termes de bien-être de politiques agissant par le canal des marchés (politiques jouant par exemple sur les prix, sur la fiscalité ou sur les échanges).

Un des principaux avantages de ces modèles est qu'ils sont capables de représenter l'ensemble des interactions (action et réaction) entre les variables économiques, et peuvent évaluer la propagation des effets de certaines politiques sur l'ensemble de l'économie.

Contrairement aux modèles macroéconométriques qui considèrent les comportements passés comme preuve de réalisme, les MEGC se fondent rigoureusement sur la théorie économique pour anticiper les comportements futurs. La plupart des MEGC utilisent cependant l'économétrie pour asseoir les fondements empiriques de certaines relations théoriques comportementales.

Les paramètres et coefficients des MEGC sont généralement déterminés par calibrage. Le calibrage est une procédure mathématique qui permet d'identifier les paramètres structurels du modèle à partir de fonctions de demande de facteurs, d'offre de travail, ou de demande de biens et services. Le calibrage permet une désagrégation très importante du modèle, contrairement aux modèles macroéconométriques.

De nombreux modèles d'équilibre général calculable ont été développés afin de rendre compte des relations complexes entre économie, énergie et environnement. On pourra citer par exemple le modèle Gem-E3 (*General Equilibrium Model for Energy-Economy-Environment interactions*) utilisé pour évaluer l'impact macroéconomique du paquet climat-énergie au niveau de l'UE¹⁶. Au niveau français, on peut citer le modèle Gemini-E3 utilisé par l'école Polytechnique fédérale de Lausanne (équipe menée par Alain Bernard et Marc Vielle)¹⁷. Conjointement développé par le Ministère français de l'équipement et l'agence française d'énergie atomique, ce modèle a été utilisé notamment pour l'élaboration de la valeur tutélaire du carbone¹⁸. Bien que ce modèle n'ait pas été utilisé récemment pour modéliser les impacts macroéconomiques de scénarios de transition énergétique, il demeure le seul et unique MEGC français utilisé dans le domaine de l'énergie et du climat.

On notera qu'au niveau international, la modélisation des interactions entre la sphère économique et la sphère environnementale a été largement dominée par les modèles d'équilibre général. En France, les modèles macroéconométriques de structure néo-keynésienne sont majoritairement plus présents.

Les modèles hybrides

Les approches macroéconomiques (MEGC ou macroéconométriques) butent assez largement sur la description des modes de production et des technologies disponibles. Or, c'est un enjeu essentiel pour l'analyse de la transition énergétique.

Les problématiques technologiques sont en revanche bien décrites dans les modèles « technico-économiques » (dits *bottom-up*). Cependant, ces derniers n'intègrent pas une vision globale de l'activité économique, généralement considérée comme exogène, et ne permettent donc pas un bouclage macroéconomique. En conséquence, ils ignorent totalement les effets de retour associés à la mise en place de politiques publiques.

Pour concilier ces deux approches, des démarches d'« hybridation » ont vu le jour. Ces modèles alternatifs cherchent à allier la description fine des technologies des modèles technico-économiques avec une description de l'équilibre macroéconomique d'où l'appellation de modèles « hybrides ». Ces modèles distinguent les différentes technologies énergétiques et traitent explicitement les variations de prix relatifs entre ces différentes technologies. De par leur composante *top down*, ces modèles supposent des réponses rationnelles aux variations des prix relatifs.

De plus, certains de ces modèles intègrent des mécanismes de déséquilibre, comme l'incertitude et les asymétries d'information. Cela est d'autant plus pertinent pour discuter les instruments de politique publique et évaluer les coûts sociaux des risques environnementaux, notamment ceux relatifs aux changements climatiques.

C'est dans cette famille que s'inscrit le quatrième modèle utilisé par le Comité « Trajectoires », le modèle Imaclim. Développé par le Centre international de recherche sur l'environnement et le développement (CIRED), ce modèle intègre une analyse sectorielle *bottom-up* à un module macroéconomique de type MEGC. Il se décline en une version de projection statique (Imaclim-S) et une version dynamique récursive (Imaclim-R)¹⁹. Ce modèle a également été utilisé pour les travaux de la Commission Quinet pour l'élaboration de la valeur tutélaire du carbone.

Un autre exemple de modèle hybride est le modèle Merge (*Model for Evaluating the Regional and Global Effects*) qui a été largement utilisé pour

évaluer les effets globaux et régionaux des politiques climatiques (Manne et Richels, 2004²⁰). Il combine une représentation *bottom-up* du secteur de l'offre d'énergie avec une formulation de l'économie globale de type équilibre général. Le modèle E3MG (*energy-environment-economy model of the globe*)²¹, développé par le centre d'économétrie de l'université de Cambridge, est un modèle hybride original puisqu'il s'agit d'un modèle macroéconométrique appliqué à l'énergie incorporant une représentation détaillée des technologies. Il est par exemple utilisé pour évaluer l'impact des engagements contraignants de réduction des émissions de GES annoncés par les pays de l'Annexe I du Protocole de Kyoto. Les modèles DICE (*Dynamic Integrated model of Climate and the Economy*) et RICE (*Regional Integrated model of Climate and the Economy*) développés par William Nordhaus sont des modèles d'optimisation appliqués à la problématique des changements climatiques. DICE a été notamment utilisé pour comparer l'efficacité de différentes politiques climatiques, ou pour analyser le rôle des taxes carbone. RICE, quant à lui, a été employé pour évaluer les impacts économiques de différents scénarios de réduction des émissions de CO₂ dans douze régions du monde²².

Grille de lecture des modélisations de la transition énergétique : quelques principes

Il n'est pas étonnant que la nature très diverse des modèles conduise *in fine* à des évaluations très hétérogènes. Il est important d'en comprendre les mécanismes et c'est l'objet de la suite de cette note. Il convient de commencer par l'identification des canaux de transmission de la transition énergétique.

La transition énergétique est le fruit de politiques volontaristes visant à orienter les comportements de consommation et de production vers des modes plus respectueux de l'environnement et plus sobres en énergie. Elle s'appuie sur un certain nombre d'instruments (taxes, contraintes réglementaires,

subventions à la production, à l'investissement ou à la R&D, investissements publics dans les infrastructures, *etc.*) qui affectent les choix des agents et donc l'équilibre économique.

C'est donc sur les mécanismes de propagation de ces instruments qu'il faut se concentrer afin d'élaborer une grille de lecture des modèles utilisés pour évaluer les effets économiques de la transition énergétique.

Trois types de politiques sont généralement mobilisés pour mettre en œuvre la transition énergétique :

- 1) Les mesures modifiant les prix ou les coûts, comme par exemple la taxation et les marchés de quotas d'émissions ;
- 2) Les mesures affectant la demande²³, comme par exemple les dépenses d'infrastructures ou le soutien à l'investissement dans des biens ou des technologies spécifiques ;
- 3) Les mesures réglementaires affectant l'offre, visant à limiter les émissions polluantes, comme par exemple les normes d'émissions et les normes techniques.

Il faut également considérer un possible effet indirect de ces instruments sur l'innovation. Par exemple, l'introduction d'un signal-prix peut inciter les industries à investir dans la R&D pour améliorer leurs produits ou leurs procédés afin de limiter l'impact de l'instrument prix sur les coûts de production (*cf. infra*). En outre, l'innovation peut jouer un rôle crucial dans la transition énergétique au travers de l'efficacité énergétique ou de l'introduction de technologies de rupture. Ainsi, des politiques de soutien à l'innovation ciblées sur l'énergie (mode de production ou de consommation) peuvent aider à l'accélération de la transition énergétique.

Ces mesures ne sont pas indépendantes et généralement la politique de transition énergétique évaluée dans les scénarios repose sur une combi-

naison de ces différents types de mesures. Cependant, il est important de les distinguer car leur point d'application dans le circuit économique et leurs impacts macroéconomiques ne sont pas identiques.

Dans cet ensemble de mesures, les normes réglementaires constituent une catégorie à part : il n'existe pas, à notre connaissance, d'étude ayant cherché à évaluer l'impact macroéconomique d'une norme et celles-ci ne sont pas modélisées dans les exercices que nous examinerons ultérieurement (Comité Trajectoires, scénarios Ademe et Greenpeace).

Les mesures réglementaires visent à contraindre le comportement des installations polluantes. Il s'agit par exemple de normes d'émissions qui définissent pour certains sites industriels, pour certains objets techniques de production et pour certains polluants des intensités maximales d'émissions. Les normes peuvent également porter sur une technologie spécifique de réduction des émissions ou sur un produit précis. Elles relèvent aussi parfois d'une obligation plus ou moins forte de conformité (*e.g.* obligation de travaux dans le secteur tertiaire ou résidentiel).

La norme impose à chaque pollueur la même contrainte quel que soit son coût marginal d'abattement. Elle a pour effet de distordre la structure d'utilisation des facteurs de production par rapport à une utilisation optimale fondée sur le système de prix. Cette distorsion empêche l'installation d'utiliser la combinaison de facteurs qui lui permet de maximiser son profit pour un coût donné. L'effet économique final dépend du degré de substituabilité entre les facteurs et du coût d'abattement de l'installation. Ce raisonnement vaut également pour les ménages (*e.g.* obligation de mise aux normes des logements). Les normes présentent le désavantage d'être difficiles à calibrer et mènent par conséquent à des résultats sous-optimaux au sens où le même résultat environnemental final aurait pu être atteint à moindre coût *via* un instrument économique (taxe ou marché de permis).

C'est pour cette raison que les politiques environnementales combinent autant que possible les instruments économiques (taxes, marchés de permis d'émissions) aux instruments réglementaires. En effet, les instruments économiques, en donnant à chaque acteur une marge de liberté pour choisir de s'ajuster ou de payer, permettent de réaliser une répartition économiquement moins coûteuse des efforts de dépollution entre pollueurs et se révèlent finalement plus efficaces en matière de lutte contre la pollution.

De surcroît, si elles sont bien calibrées, on peut supposer que les normes sont modélisées implicitement comme un instrument modifiant le prix ou le coût.

Au final, trois paramètres revêtent donc une importance particulière dans les estimations des impacts obtenues par les modèles : le traitement des prix des énergies, la modélisation du progrès technique, le rôle de l'investissement public ou privé. Ils sont traités successivement dans les paragraphes suivants.

Premier canal : les instruments de prix

D'après la théorie économique, la mise en place d'un instrument économique (prix ou quantité) permettant de rendre explicite un « prix du carbone » universel et unique est le moyen le plus efficace pour mettre en œuvre la transition énergétique. En effet, le signal-prix envoyé par l'instrument modifie les décisions des agents qui vont, de façon rationnelle, mettre en œuvre les techniques les plus efficaces de réduction de leurs émissions et s'orienter vers des choix plus sobres, sous réserve des autres contraintes (notamment de financement) qui s'imposent à eux. L'implémentation d'un instrument économique joue donc en général un rôle essentiel dans les scénarios de la transition énergétique, d'autant plus que, par sa simplicité, il se « substitue » à l'examen de mesures plus complexes de types réglementation ou incitations fiscales.

Il est clair qu'il s'agit là d'un optimum purement théorique. En pratique, le processus effectif de la transition énergétique constitue un optimum de « second rang » car des difficultés d'implémentation et des considérations non-économiques (sociales, environnementales) obligent à introduire d'autres mesures en complément d'un instrument de prix. A cela s'ajoutent également des difficultés institutionnelles liées à la mise en œuvre d'un signal-prix unique qui mènent à l'adoption d'un paquet de mesures combinant des instruments de différente nature.

A ce titre, certains scénarios considérés ici décrivent des scénarios « théoriques ». D'autres études essaient de mieux prendre en compte la diversité des instruments à la disposition des décideurs publics, comme nous le verrons par la suite.

Canaux de transmission d'une taxe carbone

Concrètement, la mise en œuvre d'une taxe carbone va se traduire par un renchérissement du prix des énergies fossiles par rapport au scénario de référence et les effets de la diffusion de ces hausses de prix sont donc tout à fait déterminants. Trois canaux de transmission des prix des énergies fossiles peuvent être identifiés.

L'introduction d'une taxe carbone entraîne une hausse du prix des énergies fossiles. De fait, la modification des prix des énergies fossiles génère des effets revenus : les consommateurs (ménages et entreprises) vont voir leur facture énergétique augmenter. Ces effets revenus entraînent à leur tour des effets de substitution : les agents vont substituer aux combustibles fossiles des produits ou des technologies plus sobres en carbone. L'effet macroéconomique final dépendra de l'ordre de grandeur relatif des effets de substitutions (effets positifs) par rapport aux effets revenus (effets négatifs).

Un second canal de transmission touche à la compétitivité de l'économie. En effet, l'introduction unilatérale d'une taxe carbone entraîne une

hausse des prix uniquement dans le pays concerné. Cela va de fait peser sur la compétitivité des entreprises nationales : elles vont soit voir leurs parts de marché diminuer ou soit absorber dans leurs marges la hausse des prix des énergies.

La taxe portant sur des biens importés pour l'essentiel (le pétrole par exemple), elle diminue parallèlement la dépendance de l'économie française vis-à-vis du reste du monde, améliore la balance commerciale et, *via* les effets de substitution, incite les ménages à davantage consommer des produits domestiques, ce qui tempère ses effets négatifs sur l'activité et l'emploi.

Toutefois, au total, l'introduction d'une taxe carbone pèserait sur la croissance économique et sur l'emploi car les effets revenus (négatifs) seraient supérieurs aux effets de substitution (positifs).

Ainsi, dans les modèles macroéconométriques comme Mesange, Nemesis et Threeme, un instrument modifiant les prix, comme par exemple une taxe carbone, pèse sur le pouvoir d'achat des ménages qui diminuent leur consommation et sur

les entreprises qui réduisent également leur demande en consommations intermédiaires énergétiques. Ce choc de demande affecte la production intérieure qui diminue. La baisse de la production entraîne une diminution du niveau de l'emploi et des salaires nets ; au final, le revenu disponible nominal diminue. A court et moyen terme, la taxe a de fait un effet récessif et inflationniste.

Le dernier canal de transmission concerne l'utilisation des recettes de la taxe carbone. L'effet macroéconomique de cette taxe pourrait devenir positif si ses recettes étaient utilisées pour compenser la baisse de prélèvements plus distorsifs comme, par exemple, les charges pesant sur le travail (*cf. infra*).

Dans les modèles d'équilibre général, l'introduction d'une taxe carbone sans recyclage des recettes va affecter négativement l'économie tout comme dans les modèles néokeynésiens. Toute variation de prix modifie directement la demande (ou l'offre) de tous les agents qui sont directement concernés par la taxe carbone, et se répercute sur l'ensemble de

La modélisation des prix des énergies

Dans la plupart des modèles macroéconométriques comme Mesange, Threeme et Nemesis, le prix des énergies fossiles n'est pas modélisé : il est exogène. L'unique déterminant du prix des importations énergétiques est le prix du pétrole, qui constitue l'ancrage du prix modélisé à long terme et qui influe également sur la dynamique de court terme.

Dans les modèles d'équilibre général ou hybrides, le prix des énergies fossiles est déterminé de manière endogène : les prix résultent de la confrontation de l'offre et de la demande sur les différents marchés. Le système de prix global est fondé sur le prix d'un bien numéraire fixé arbitrairement. Ainsi, dans Gemini-E3, le système de prix global est défini à un facteur multiplicatif près. Les prix sont déterminés à partir du prix du bien numéraire (choisi à partir de l'utilisation explicite de taux d'intérêt et de taux de change pour chaque période et chaque pays*) auquel sont ajoutées les taxes indirectes, en combinant les différents biens à l'aide des coefficients structurels.

Dans Imacim, le prix du pétrole reflète le niveau de tension entre l'offre et la demande mondiales ; l'évolution du prix du gaz est indexée sur celle du pétrole *via* un coefficient d'indexation décroissant calibré sur les résultats du modèle de l'Agence internationale de l'énergie (*World Energy Model*). En ce qui concerne le charbon, Imacim détermine son prix et sa trajectoire de prix à partir des capacités de production régionales et de l'évolution des coûts de production.

* Le taux de change entre deux pays est le prix relatif des biens numéraires choisis dans chacun des pays et fondé sur un panier de biens représentatif du PIB du pays en question.

l'économie *via* la variation de la demande (ou de l'offre) de ces agents. Les effets revenus liés à la taxe carbone déclenchent de nouveaux comportements (en termes de prix, salaires, profits) et affectent les variables déterminants l'équilibre macroéconomique.

Bien que les MEGC soient qualifiés de « modèles d'offre », ils sont très adaptés à la prise en compte des effets liés à une variation des prix, que ce soit du côté de l'offre ou de la demande.

Les possibilités de substitution technologique jouent un rôle essentiel

Les effets revenus qui découlent de l'introduction d'une taxe carbone vont affecter les choix technologiques et les modes de production (y compris de l'électricité) de l'ensemble des agents économiques. La manière dont sont représentées les possibilités de substitution technologique dans les différents modèles revêt donc une importance majeure.

Les modèles macroéconomiques traditionnels ne disposent pas d'une représentation fine et détaillée des technologies et ont tendance à conclure que les opportunités de substitution (entre énergies ou entre technologies) sont limitées. Tout changement de technologie a par conséquent un coût très élevé pour l'économie.

La plupart des modèles adoptent une fonction de production à élasticité de substitution constante (CES). Ces fonctions de production CES sont généralement emboîtées afin de bien prendre en compte l'impact d'une variation des prix, à travers les élasticités-prix directes et croisées, ainsi que les relations de complémentarité et/ou de substituabilité entre les facteurs de production. C'est le cas par exemple dans Mesange. Cependant, cette spécification ne permet pas d'évaluer les opportunités de futur progrès technique. Les substitutions entre sources d'énergie et entre techniques de production sont en effet représentées par des élasticités

constantes qui sont calibrées à partir des données historiques et qui n'évoluent pas dans le temps.

Des modélisations plus fines sont alors considérées dans certains modèles. Par exemple, Threeme adopte une forme plus flexible de la fonction de production (*generalised CES function*) qui permet de différencier l'élasticité de substitution selon le facteur de production. Autrement dit, dans Threeme, l'élasticité de substitution entre le capital et le travail n'est pas la même que celle entre le capital et l'énergie. Cette flexibilité est également employée pour représenter la substituabilité entre les différentes sources d'énergie et les différents biens de consommation.

Nemesis utilise également des fonctions de production CES emboîtées mais ajoute une spécificité puisqu'il retient cinq facteurs de production : le capital, le travail qualifié, le travail non qualifié, l'énergie, les matériaux. Les fonctions de production sont de type CES, emboîtées sur quatre niveaux et présentent des valeurs pour les élasticités de substitution différentes selon les secteurs de production. Ce modèle présente en outre la particularité de comprendre un module « énergie » très détaillé, avec une fonction de production spécifique pour le secteur de l'électricité de type Leontief qui inclut les coûts moyen de l'électricité pour chaque technologie.

Dans le modèle Nemesis, l'effet d'une taxe carbone passe par les prix et les substitutions qu'elle engendre. Cependant, le modèle suppose que les taux de marge des secteurs sont fixes, ce qui signifie que toute hausse du prix des énergies se répercute *in fine* dans les prix de production. Dans Mesange, cet enchaînement se réalise également mais pas à court terme car Mesange suppose qu'une hausse du prix des consommations intermédiaires va d'abord se traduire par une baisse du taux de marge. A long terme l'effet est identique dans les deux modèles, mais les effets de moyen terme ne seront pas nécessairement identiques dans les deux modèles.

Le modèle Gemini-E3 adopte également des fonctions de production CES emboîtées mais le niveau de désagrégation est très élevé. En particulier, une modélisation très fine du marché de l'immobilier a été récemment développée afin de prendre en compte l'ensemble des mécanismes économiques, résultant soit de changements des conditions de marché, soit de politiques économiques (e.g. normes thermiques), que ce soit à court, moyen ou long terme.

Imaclim abandonne cette formulation de fonction de production agrégée au profit d'une reconstitution *bottom-up* de la fonction de production. Aucune forme particulière de la fonction de production n'est spécifiée *a priori*. À chaque itération, le modèle définit la frontière des possibilités de production à partir de l'information contenue dans les données technologiques du modèle. Il projette les évolutions des techniques et des capacités installées, en tenant compte des anticipations des agents concernant les signaux-prix futurs et la demande future, des capacités de financement disponibles et du progrès technique incrémental d'une année sur l'autre. À chaque date, les agents peuvent choisir de nouveaux équipements de façon flexible parmi un portefeuille de technologies disponibles ; ces choix induisent une modification à la marge des coefficients *input-output* et de la productivité globale, en tenant compte des technologies déjà incorporées dans les équipements existants, qui résultent des choix techniques passés. Ceci revient à une fonction de production dite « putty - clay », qui permet de représenter l'inertie des systèmes techniques : à court terme, il n'y a pas de substitution possible des facteurs de production (les coefficients techniques sont fixes). Les nouveaux coefficients techniques actualisés sont ensuite utilisés pour la résolution de l'équilibre statique suivant.

L'impact final de la taxe carbone dépend également de la manière dont sont modélisées les possibilités de substitution pour les ménages. Ainsi, dans Mesange, les effets revenus dominant parce que les possibilités de substitution des ménages sont limitées : l'introduction d'une taxe carbone a un effet

très récessif à court terme (en l'absence de recyclage des recettes de la taxe). L'effet récessif est atténué dans Nemesis et Threeme parce que ces modèles intègrent des possibilités de substitution plus variées du côté des ménages. En particulier, Threeme distingue les effets de substitution des effets de sobriété et d'efficacité, en modélisant de manière endogène et détaillée les choix énergétiques des ménages.

Les possibilités de substitution des ménages sont également endogènes et très détaillées dans Gemini-E3 et dans Imaclim. La fonction de consommation des ménages distingue dans ces deux modèles l'énergie des autres biens. Ensuite, ces deux modèles séparent l'énergie utilisée pour les transports de celle employée à des fins résidentielles (chauffage, éclairage, cuisine, etc.) en prenant en compte cinq types d'énergie (charbon, gaz, pétrole, produits pétroliers, électricité) et plusieurs modes de transport. Enfin, ces modèles vont plus loin dans le détail en tenant explicitement compte de l'équipement en transport et en logement des ménages.

Le lien entre les possibilités de substitution et horizon temporel est évident : les comportements de substitution sont plus faciles lorsque le temps nécessaire à l'ajustement est long. Aussi, les modèles d'équilibre général et hybrides présentent-ils un avantage par rapport aux modèles macroéconométriques puisque leur horizon temporel est plus long que celui considéré généralement par ces derniers : la période d'ajustement technologique pourra ainsi être intégralement prise en compte.

La possibilité du « double dividende »

Si l'on considère l'introduction d'une taxe carbone sans redistribution de ses recettes dans l'économie, tous les modèles, quelle que soit leur nature, concluront à un effet récessif de la taxe. En revanche, les résultats changent dès lors que l'aspect redistributif entre en jeu. Selon le modèle considéré, le mode de redistribution des recettes affectera positivement le PIB à plus ou moins long terme, plus ou moins fortement.

Ainsi, dans un modèle macroéconomique tel que Mesange, lorsque les recettes de la taxe carbone sont utilisées pour financer une baisse des prélèvements les plus distorsifs, comme par exemple les cotisations sociales pesant sur le travail en France, l'impact macroéconomique peut être positif dès le court terme. La baisse du coût du travail stimule l'emploi et réduit l'inflation. La baisse des coûts de production permet de renforcer la compétitivité-prix des entreprises françaises et d'augmenter l'activité. La mise en place de la taxe recyclée en une baisse des cotisations sociales employeurs permet un surcroît d'activité et d'emploi à moyen et long termes.

C'est ce que l'on appelle le double dividende : l'introduction d'une taxe carbone avec redistribution de ses recettes entraîne un bénéfice environnemental (réduction des émissions de CO₂ – premier dividende) et un bénéfice économique (augmentation du PIB et de l'emploi – deuxième dividende). La plupart des scénarios de transition énergétique combinent l'introduction d'un signal-prix explicite (e.g. une taxe carbone) à une redistribution des recettes. Mais l'effet net de cette combinaison diffère selon le modèle utilisé. Il est généralement fortement positif dans les évaluations réalisées à partir de modèles macroéconométriques (e.g. Nemesis, Mesange et Threeme), légèrement positif dans les évaluations réalisées à partir de modèles d'équilibre général (e.g. Gemini-E3), voire négatif dans certains cas (e.g. Imaclim)²⁴.

Cependant, il faut noter que l'apparition d'un double dividende est liée à l'existence de rigidités sur le marché du travail, comme c'est le cas dans les modèles macroéconométriques. En rendant possible une relance de la demande par une baisse du coût du travail, les modèles keynésiens estiment que la transition énergétique aurait un effet positif élevé sur le PIB et sur l'emploi. Les effets récessifs d'une taxe carbone (i.e. hausse du coût de l'énergie ; hausse de la fiscalité environnementale) sont compensées par les effets expansionnistes tels que la hausse de l'emploi liée à l'essor de nouvelles activités, la baisse de la facture énergétique à moyen terme (qui permet d'accroître la consommation sur d'autres secteurs), la redistribution des

recettes de la fiscalité environnementale aux ménages, ainsi qu'à l'amélioration de la balance commerciale à moyen terme (baisse des importations d'énergies fossiles du fait de la hausse des prix de ces énergies). Au total, l'effet net est positif pour l'économie.

En revanche, dans les modèles où le marché du travail est parfaitement flexible, hypothèse classique retenue dans les modèles d'équilibre général, le double dividende n'apparaît que dans des conditions exceptionnelles. En effet, dans un modèle d'équilibre général, l'introduction d'une taxe carbone introduit une distorsion des prix relatifs des biens finaux, ce qui provoque une baisse d'utilité du revenu nominal, entraînant une baisse de la demande finale de biens et donc un recul de l'activité économique. Les modèles d'équilibre général obtiennent ainsi des effets macroéconomiques moins favorables et inférieurs à ceux donnés par les modèles keynésiens, comme le soulignent les travaux du Comité Trajectoires. Dans le cadre de ces travaux, les résultats du modèle Imaclim ne soutiennent pas l'hypothèse d'un double dividende très élevé : la redistribution des recettes de la taxe ne permet pas de compenser l'effet récessif de la taxe carbone ; des pertes de PIB subsistent même si le recyclage des recettes de la taxe carbone les atténue. Cela s'explique notamment par le fait qu'Imaclim prend en compte beaucoup plus de rigidités technico-économiques que ne le font les autres modèles.

Deuxième canal : les soutiens de la demande

La transition énergétique vise à modifier les comportements des agents économiques de manière à être plus respectueux de l'environnement. Ainsi, il est possible de mettre en place dans ce contexte des mécanismes incitant à consommer des biens sobres en carbone spécifiques, ciblés par lesdits mécanismes (e.g. énergie renouvelable, mode de transport moins polluant). Ces mécanismes de soutien de la demande (e.g. subvention,

tarif de rachat) nécessitent des investissements qui concerneront à la fois le secteur privé et le secteur public et conditionneront le succès des réformes implémentées. Il est donc important de comprendre le rôle de l'investissement public ou privé dans l'économie.

Cependant, ces investissements ne se feront pas à coût nul pour l'agent concerné. Il faut donc également s'intéresser aux contraintes de financement que rencontrent les acteurs privés (principalement les ménages) comme publics.

Le rôle de l'investissement

Les mesures de dépenses d'infrastructures et d'investissements sobres en énergie soutiennent la demande et ont à ce titre des effets de type keynésiens (*cf.* l'effet multiplicateur). Dans les modèles macroéconométriques néo-keynésiens comme Mesange, Threeme et Nemesis, la demande finale de biens est le principal déterminant du fonctionnement de l'économie au moins à court et moyen terme. L'effet de l'investissement sur la croissance et sur l'emploi dépend de ce que l'on appelle l'effet multiplicateur. Selon la relation keynésienne du multiplicateur d'investissement, une hausse de l'investissement public permet une hausse du revenu national (PIB), qui permet à son tour une hausse de la consommation ; cette hausse de la consommation entraîne quant à elle une augmentation de la production (donc du revenu national) et ainsi de suite. Ces allers-retours entre le revenu national et la consommation amplifient l'accroissement du revenu national. Au total, une hausse de l'investissement public permet de relancer la croissance économique à court terme avec un effet multiplicateur. Celui-ci dépend de la nature de la dépense publique (*e.g.* dépense de consommation, d'investissement ou d'intervention – subventions, crédits d'impôts) ainsi que de son mode de financement (un financement par la fiscalité ou par la diminution d'autres dépenses publiques peut avoir un effet d'éviction ; l'effet multiplicateur est généralement plus grand si le financement est réalisé *via* la dette ou la création monétaire).

Dans ces modèles, la hausse de la demande liée à la dépense publique a un effet fortement positif sur le PIB et l'emploi à court terme. Mais du fait de la nature *a priori* classique de ces modèles à long terme, cet effet favorable se résorbe rapidement et l'effet résiduel est négatif puis quasi nul. La hausse de la demande induite par l'investissement provoque des tensions sur les prix et les salaires qui limitent puis annulent les effets positifs de l'investissement sur le PIB, conduisant à un impact négatif sur l'économie quand l'investissement s'arrête. A long terme, l'économie est sur son sentier de croissance et les mécanismes d'accélérateur et de multiplicateur ne jouent plus.

L'étude de la Direction générale du Trésor qui évalue les impacts macroéconomiques du Grenelle de l'environnement à partir du modèle Mesange en est une parfaite illustration : à court terme, la croissance et l'emploi sont fortement stimulés par les dépenses d'investissement prévues dans le cadre du Grenelle du fait des effets multiplicateurs décrits ci-dessus (qui dominent l'impact négatif du financement de ces investissements sur l'économie) ; à long terme, le ralentissement puis l'arrêt des investissements associés à la hausse des prix et du niveau des prélèvements obligatoires (nécessaires pour financer ces dépenses) annulent les effets positifs sur l'économie du Grenelle après 2020 : l'impact sur le PIB est nul. Les impacts relatifs sur le PIB et l'emploi deviennent négatifs à partir de 2021 (seul l'effet inflationniste demeure).

La finesse dans la modélisation des mesures de soutien de la demande va jouer un rôle important. Dans Mesange, il est possible de distinguer les mesures s'appliquant aux ménages, celles visant les entreprises, et celles destinées à la sphère publique (*cf.* étude sur les impacts du Grenelle de l'environnement). Dans Threeme, le degré de détail est plus important : les mécanismes de crédit d'impôt sont introduits de manière explicite dans les équations de dépenses de l'Etat et dans les choix d'investissement des ménages.

Dans les modèles d'équilibre général comme Gemini-E3 et Imaclim, les effets des mesures en faveur de la demande ne sont pas appréhendés de la même manière. En effet, dans la théorie classique, l'investissement (qui crée le capital physique) est uniquement financé par l'épargne disponible. Il est endogène et c'est lui qui s'ajuste (*via* les taux d'intérêt) pour assurer l'égalité *ex post* entre ces deux variables. Le niveau d'épargne étant donné, il n'est pas possible d'augmenter l'investissement d'un secteur sans diminuer celui d'un autre. Il peut se produire un effet d'éviction total si les dépenses additionnelles ne constituent pas une source directe d'utilité ou de productivité.

De plus, la contrainte budgétaire intertemporelle de l'Etat fait que les dépenses publiques engagées sont prélevées maintenant ou plus tard sur les agents économiques. Comme ces modèles supposent l'existence d'anticipations rationnelles ou parfaites des agents, cela signifie que ces derniers prennent en compte dès l'annonce des mesures de dépenses l'augmentation future des prélèvements. Ainsi, les consommateurs savent que leur richesse va baisser dans un futur proche et n'accroissent pas leur niveau de consommation. En conséquence, dans les modèles d'équilibre général, l'augmentation des dépenses publiques n'entraîne pas une hausse de la demande. La hausse de l'investissement ne va pas se traduire par une hausse de la productivité globale des facteurs susceptible d'entraîner une hausse durable du PIB. Ainsi, toute relance par l'investissement public est inopérante à long terme.

Prendre en compte le financement de l'investissement

La question du financement de la transition énergétique doit faire l'objet d'une attention particulière. C'est un des aspects essentiels pour définir des scénarios crédibles. Ce financement peut être réalisé de deux manières :

- *Via* le déficit public : on peut supposer que les mesures de soutien de la demande provoquent une hausse des dépenses publiques. Cette

hausse des dépenses publiques peut être soit financée par une baisse d'autres dépenses et/ou une hausse équivalente des prélèvements obligatoires (situation à finances publiques inchangées), soit financée par de l'endettement (on laisse filer le déficit public) ;

- *Via* les contraintes sur les agents privés : les investissements sont financés soit à partir des ressources privées (désépargne ou endettement), soit en réduisant d'autres dépenses de consommation ou d'investissement.

L'étude de la DG Trésor sur les impacts macroéconomiques du Grenelle de l'environnement évalués par Mesange illustre bien l'importance du profil des investissements et des choix de financement. Elle fait l'hypothèse que les ménages lissent parfaitement leur consommation, réduisant leur épargne financière à court terme et l'augmentant à moyen terme. Le taux d'épargne des ménages reste inchangé sur la période. L'approche inter-temporelle retenue dans l'étude est particulièrement révélatrice : les investissements provoqués par les mécanismes de soutien (ici l'éco-PTZ) ont un effet très positif à court terme du fait de l'effet multiplicateur de l'investissement. L'arrêt des investissements à moyen terme provoque un choc négatif de demande et a un impact négatif sur le PIB (dans les années qui suivent). L'effet global sur l'activité ressort alors nul sur le long terme.

Il apparaît donc indispensable de bien comprendre les interactions entre sphère financière et sphère économique. Dans les modèles néoclassiques, la monnaie est neutre, c'est-à-dire qu'elle n'a aucun impact sur les volumes et joue uniquement sur les prix. Ainsi, dans les MEGC, la monnaie, endogène, est rendue facultative : la courbe LM (qui représente l'équilibre entre l'offre et la demande de monnaie) est remplacée par une règle sur le taux d'intérêt. Ces modèles ne comprennent donc ni crédit, ni secteur bancaire. L'ajustement se fait par le taux d'intérêt qui égalise l'offre et la demande de capital émanant des ménages et des entreprises. Dans Gemini-E3 et Imaclim, le taux d'intérêt est ainsi endogène.

Dans les modèles néo-keynésiens, le taux d'intérêt est exogène (Mesange et Nemesis) ou déterminé par des considérations sur le policy mix (règle de Taylor dans Threeme) qui ne sont pas liées aux marchés financiers. Pour autant, le crédit, même s'il n'est pas explicité, peut jouer un rôle fondamental. Il est en effet supposé que l'Etat et les agents privés trouvent en toutes circonstances les moyens de se financer. En général, ces modèles négligent les phénomènes de retour financier, comme par exemple une hausse des taux d'intérêt qui proviendrait d'une hausse excessive de l'endettement. Le risque est alors de mettre en œuvre des scénarios « non financés » et donc non crédibles.

Ceci montre également l'intérêt de regarder l'ensemble des effets d'un scénario sur l'ensemble de la période, et non pas simplement à une date bien précise (e.g. en 2020, en 2030, en 2050). La prise en compte de la chronique d'investissement dans sa globalité garantit l'évaluation des effets nets sur l'économie de scénarios de long terme de transition énergétique.

Il apparaît donc tout à fait crucial d'analyser précisément les contraintes de financement associées aux scénarios de transition énergétique, en particulier les trajectoires de taux d'épargne et de déficit public correspondantes pour évaluer la pertinence et le réalisme du scénario de transition énergétique considéré.

Le progrès technique est un facteur-clé

Le progrès technique est un facteur-clé de la croissance économique. Les travaux de Romer, relayés par le modèle d'Aghion et Howitt (1992)²⁵, ont transformé la vision du rôle du progrès technique : la croissance économique est endogène, en ce sens qu'elle permet l'accumulation d'un ensemble de connaissances et de savoir-faire qui permettent d'accroître la productivité.

Le rôle du progrès technique sur la croissance

On peut donc, par des mesures structurelles appropriées, modifier le taux de croissance de long terme. Cela s'explique principalement par des externalités positives liées à l'accumulation des connaissances et du capital humain²⁶ qui font que le rendement social du capital est supérieur à son rendement privé.

Le modèle canonique de la croissance endogène s'appuie sur la décision de R&D qui peut conduire à des innovations de procédés ou de produits. Les innovations de procédés accroissent la productivité globale des facteurs, ce qui augmente la demande de produits, réduit le coût unitaire de production et donc le prix. La baisse du prix induit une hausse de la demande qui dépend de l'élasticité prix de la demande. La baisse du prix permet également à l'entreprise d'être plus compétitive sur son marché.

Les innovations de produits sont considérées comme des améliorations de qualité. Cela se traduit par une augmentation de l'efficacité par unité de volume, ce qui entraîne une hausse de la demande.

Les effets de l'innovation sur le PIB dépendent eux-mêmes des effets de l'accroissement de la connaissance sur la productivité globale des facteurs et sur la qualité, donc sur la demande.

Dans le cadre de la transition énergétique, le progrès technique présente un intérêt particulier, notamment les avancées réalisées en termes d'efficacité énergétique. En effet, une amélioration de l'efficacité énergétique de la production signifie qu'il faut moins de combustibles pour produire la même quantité de produit, ce qui peut se traduire par une baisse des consommations énergétiques, entraînant à son tour une diminution du coût de production. Plus l'amélioration de l'efficacité énergétique est forte, plus la baisse du coût est importante, et plus cela peut avoir des répercussions positives sur l'économie. Ce raisonnement vaut

également pour le progrès technique appliqué aux biens de consommation finale : les ménages peuvent disposer par exemple d'équipements électroménagers plus performants, qui vont réduire leur consommation d'énergie, ce qui leur permet d'augmenter potentiellement leur consommation d'autres biens. La manière de modéliser le progrès technique est donc cruciale.

Progrès technique exogène vs. endogène

Le progrès technique peut être modélisé de deux manières : soit on considère qu'il est exogène, c'est-à-dire que l'on suppose qu'il ne réagit pas aux variations des prix de l'énergie, aux politiques énergétiques, *etc.*, soit on suppose qu'il est endogène dans le cas inverse. Ce choix de modélisation n'est pas anodin car il joue un rôle important dans l'évaluation des impacts macroéconomiques des scénarios de transition énergétique.

Il est difficile d'intégrer le progrès technique de manière endogène du fait de l'absence d'indicateur de progrès technique directement observable. Aussi, le progrès technique est-il intégré de manière exogène dans la plupart des modèles sous forme d'une ou plusieurs tendances autonomes (*i.e.* indépendante des conditions économiques qui prévalent) qui affectent le sentier de croissance de l'économie (national ou global). Cette modélisation du progrès technique est retenue dans Mesange, Threeme et dans Gemini-E3. Dans ce dernier modèle, le progrès technique joue à plusieurs niveaux : des paramètres de progrès technique sont intégrés *via* par exemple des prévisions sur l'évolution de l'efficacité énergétique (progrès technique négatif incorporé à l'énergie) ou sur les surcoûts des équipements (progrès technique négatif incorporé au capital). Il n'en reste pas moins que le progrès technique n'est influencé par aucune décision ou mesure politique et qu'il est atteint de manière un peu « mécanique ». Cette situation contraint donc l'analyse des politiques économiques, la seule réponse des agents économiques face à une augmentation du prix de l'énergie reposant uniquement sur les possibilités de substitutions.

Quelques modèles retiennent une spécification endogène du progrès technique. On suppose alors que celui-ci peut résulter de mesures gouvernementales ou d'investissements spécifiques visant par exemple à améliorer l'efficacité énergétique. Cette approche permet d'élargir l'ensemble des possibilités de réponse des agents économiques face à la mise en place de certaines mesures publiques. Face à une modification des prix des facteurs de production, les agents ne sont plus limités aux choix de substitution et peuvent désormais réagir en termes de choix de progrès technique (*e.g.* action de R&D pour conduire à des innovations de procédés ou de produits, développement du capital humain).

Dans Nemesis, le progrès technique est directement lié aux dépenses de R&D qui se traduisent par des innovations en termes de productivité et de qualité. La R&D effectuée par l'entreprise génère des gains d'efficacité, ce qui permet d'accroître la productivité globale des facteurs. L'endogénéisation du progrès technique est intégrée à la fois *via* une variable de « connaissance » fondée sur le stock de R&D et des courbes d'apprentissage. Le modèle inclut également des délais entre les efforts de R&D et la concrétisation par des innovations, de l'ordre de 3 à 6 ans. Le progrès technique en affectant la productivité du travail, influence à la fois le taux de chômage naturel et le niveau du PIB, accroissant ainsi le niveau de la croissance potentielle.

Dans Imacim, le progrès technique dépend également de l'apprentissage, et donc des interactions entre les variations des prix relatifs et les investissements cumulés. L'effet d'apprentissage et les mécanismes de R&D sont des facteurs qui contribuent à la définition d'un progrès technique endogène.

A long terme, les modèles, qu'ils soient macroéconométriques, hybrides ou d'équilibre général, sont néoclassiques (« à la Solow ») : l'économie converge vers son sentier de référence et le PIB par tête croît selon l'évolution du progrès technique. La manière d'envisager le progrès technique a donc des conséquences significatives sur l'analyse

de l'efficacité d'une politique et sur ses impacts macroéconomiques. Cela est d'autant plus vrai dans le domaine de la transition énergétique où le progrès technique est déterminant (au travers de technologies existantes mais non encore matures économiquement, ou de technologies à découvrir et potentiellement de rupture). Ainsi, si le progrès technique est considéré comme exogène, les résultats tendront à recommander d'attendre l'avènement de technologies futures plus efficaces avant de mettre en place la politique considérée afin de limiter son coût sur l'économie. A l'inverse, si le progrès technique est considéré comme endogène, les estimations inciteront à la mise en place rapide de la politique afin de stimuler et diffuser les technologies permettant d'atteindre l'objectif environnemental fixé, de créer de l'emploi et de favoriser la croissance économique.

Concrètement, on observe que les modèles qui intègrent le progrès technique de manière endogène obtiennent des effets macroéconomiques plus favorables que les autres modèles, en particulier lorsque le produit de la contrainte carbone est redistribué sous forme de soutien de l'innovation.

Il ne faut cependant pas oublier que les effets positifs sur la croissance et l'emploi observés dans les études recourant à des modèles où le progrès technique est endogène, s'expliquent souvent par le fait que le scénario évalué considère une action unilatérale d'un pays (*i.e.* un seul pays introduit des mesures visant à déclencher une transition énergétique), en supposant que les autres pays ne modifient pas leurs politiques. Cette hypothèse est particulièrement forte et peut paraître discutable au regard de la réalité économique, plus particulièrement dans le cas de l'innovation (*e.g.* externalités de connaissance). Il apparaît que la prise en compte d'actions similaires dans les autres pays atténuerait fortement les résultats obtenus.

Aussi convient-il d'évaluer les effets de la transition énergétique sur la compétitivité de l'économie. Bien que certains déterminants de la compétitivité soient pris en compte dans les modèles (notamment *via* les prix), les différents

canaux de la compétitivité doivent être mieux documentés étant donné que certaines mesures politiques peuvent significativement l'affecter (*e.g.* redistribution du produit de la taxe sous forme de baisse des charges pesant sur le travail ou de soutien à l'innovation).

En outre, si la modélisation endogène du progrès technique peut paraître séduisante, elle est en réalité discutable lorsqu'elle provient de mécanismes d'accumulation et non pas d'une description fine des possibilités technologiques. Il ne va pas forcément de soi que, dans des variantes, l'augmentation des efforts de R&D permettent systématiquement des gains de productivité. Ceci suppose en effet que dans le scénario central, certaines possibilités technologiques n'ont pas été explorées faute de financement.

Le bouclage macroéconomique conditionne l'équilibre atteint

Si l'on souhaite évaluer les impacts macroéconomiques de la transition énergétique, il faut recourir à des modèles qui adoptent une vision globale de l'économie à partir de la représentation de l'ensemble des interactions économiques entre les différents agents (ménages, entreprises et Etat). C'est ce que l'on appelle le « bouclage macroéconomique ». Seules les études reposant sur ces modèles permettent d'évaluer les effets nets sur l'économie (*i.e.* le solde entre les effets positifs et les effets négatifs).

La compréhension des mécanismes de bouclage des modèles est essentielle

La nature du bouclage macroéconomique des modèles est essentielle pour comprendre le résultat des simulations. Il existe deux grandes familles de bouclage : les modèles d'inspiration « classique » et les modèles « néo-keynésiens ». Elles s'opposent par leur conception de l'équilibre de long terme.

Les modèles macroéconométriques s'inspirent à court terme du schéma keynésien traditionnel : la demande détermine le produit, puis les variables de tension, les salaires et les prix. La dimension sectorielle introduit ensuite le mécanisme d'accélérateur et la courbe de Phillips, interaction avec la formation des prix de production à l'origine de la boucle prix-salaires.

Le bouclage macroéconomique de chaque modèle joue donc un rôle clé, en particulier le chômage. Dans les modèles néokeynésiens comme Mesange, Threeme et Nemesis, la boucle prix-salaires s'avère fondamentale dans la dynamique du modèle. Celle-ci représente la relation entre les variables réelles et les variables nominales du modèle. Elle permet de passer des effets de court terme à l'équilibre de long terme *via* les forces de rappel.

Dans les trois modèles, les modélisations sont proches (courbe WS-PS ou courbe de Phillips), de sorte que le taux de chômage d'équilibre dépend essentiellement des paramètres structurels du marché du travail. Il peut augmenter durablement après un choc d'offre défavorable mais est en théorie largement inchangé à long terme par un choc de demande.

Le cadre d'analyse macroéconomique privilégie ici le rôle de la demande. Une politique affectant la demande peut donc avoir des effets sur la croissance de l'emploi, au moins à court terme. En revanche, l'équilibre de long terme devient néoclassique et est déterminé par les paramètres structurels (chômage et progrès technique). Ainsi, à long terme, les effets des mesures de soutien de la demande sur l'activité et l'emploi sont limités (*cf.* étude de la DG Trésor) sauf si les forces de rappel sont faibles.

Aussi paraît-il important de regarder la chronique des impacts macroéconomiques de la transition énergétique sur une période aussi longue que possible au lieu de se focaliser sur les impacts à des dates précises (*e.g.* 2030, 2050). Cela limiterait les risques de mauvaise interprétation des résultats (liés aux propriétés de convergence du modèle en

question) et permettrait également de mieux prendre en compte les effets transitoires et les délais d'ajustement de l'économie à l'introduction d'un signal-prix.

Dans un modèle néoclassique, la dynamique économique résulte de la confrontation, *via* les mécanismes de marché, des comportements d'optimisation des agents microéconomiques (consommateurs, producteurs, Etat, reste du monde). L'ajustement entre l'offre et la demande sur l'ensemble des marchés détermine un vecteur de prix d'équilibre ainsi que l'allocation des ressources et la répartition des revenus entre les agents. L'équilibre de long terme est déterminé par les paramètres structurels de l'économie, à savoir le taux de croissance de la population et le progrès technique. Les paramètres structurels du marché du travail déterminent le chômage de long terme et le coût relatif des facteurs détermine le niveau de production.

La dynamique d'un MEGC est principalement liée aux conditions d'offre de l'économie, au travers des possibilités techniques représentées par la fonction de production de chaque secteur d'activité économique, d'une part, et des mécanismes d'accumulation du capital, d'autre part. Toute impulsion de demande se répercute sur les prix mais sera sans impact sur l'activité à long terme.

Par exemple, Gemini-E3 est un modèle classique et sa dynamique est liée à l'offre : d'une part, les possibilités techniques représentées par les fonctions de production de chaque secteur, et d'autre part les mécanismes d'accumulation du capital. De même, Imaclim présente une structure néoclassique à chaque période. Dans ces modèles, toute contrainte a un effet négatif sur la croissance et donc sur l'emploi.

L'analyse du scénario de référence doit être faite

Une caractéristique commune à l'ensemble des études et des modélisations est qu'elles présentent des résultats en écart à un scénario dit de référé-

rence. Ce scénario donne une trajectoire potentielle de l'économie, à caractéristiques données, avant que les mesures de transition énergétique aient été introduites.

Ce scénario est fondé sur un certain nombre d'hypothèses qui vont déterminer l'évolution des principales variables du modèle, comme par exemple le PIB, les prix des énergies, la démographie, *etc.* En particulier, la croissance du PIB de référence est généralement déterminée par des hypothèses faites sur le progrès technique, la croissance de la force de travail et le taux d'épargne.

Les émissions de gaz à effet de serre (GES) sont aussi en grande partie déterminées par ces hypothèses puisqu'elles sont fortement liées à l'évolution du PIB et de la population, à la disponibilité des ressources énergétiques et à leur prix, et à la disponibilité des technologies d'abattement et à leur coût. Donc, l'ambition des contraintes de réduction des émissions de GES est en fait déterminée par les hypothèses sur la croissance économique de référence. Plus les émissions du scénario de référence sont élevées, plus d'émissions de GES devront être réduites pour atteindre l'objectif.

De même, la rentabilité des projets d'investissement sobres en CO₂ qui conditionne l'impact macroéconomique est déterminée par le prix des énergies carbonées retenu dans le scénario de référence. Les hypothèses cruciales du scénario central peuvent également être liées à la description de l'évolution des coûts des différentes technologies.

Le choix du scénario de référence apparaît comme crucial et déterminera en partie les résultats. Il est donc indispensable de bien expliciter le scénario de référence.

Enfin, on notera qu'une limite importante de l'ensemble des modèles macroéconomiques (macroéconométrique ou équilibre général calculable) est leur mauvaise prise en compte des dommages économiques du changement climatique. Cette boucle de rétroaction est quasiment inexistante ou incomplète. De fait, les scénarios de référence auxquels sont comparés les scénarios de politiques climatiques ou énergétiques représentent mal la réalité complexe liant l'environnement à l'économie.

Éléments de comparaison des modèles

	Modèle d'équilibre général	Modèles macroéconométriques			Modèle hybride
	GEMINI-E3	MESANGE	NEMESIS	THREEME	IMACLIM-R
• Prix des énergies					
Effets substitution	+	0	+	+	+
Effets revenus	+	+	+	+	+
Effets compétitivité	0	0	0	0	0
Double dividende	+	+	+	0	+
• Progrès technique	0	0	+	0	+
• Investissement					
Privé	+	0	0	0	+
Public	+	0	0	0	+

Lecture du tableau : le signe « 0 » indique que l'effet existe dans le modèle mais que le traitement est basique ; le signe « - » indique que l'effet n'existe pas dans le modèle ; le signe « + » indique que l'effet existe dans le modèle et que le traitement est sophistiqué.

La grille de lecture appliquée aux scénarios de la transition énergétique : pourquoi les études donnent ces résultats ?

Trois paramètres revêtent une importance particulière dans l'estimation des impacts macroéconomiques de la transition énergétique : le traitement des prix des énergies, la modélisation du progrès technique et le rôle de l'investissement public ou privé.

Forces et faiblesses des différentes familles de modèles

A partir de cette grille de lecture, il est possible de comparer les modèles et d'identifier leurs forces et faiblesses respectives dans la perspective d'évaluer les impacts macroéconomiques de la transition énergétique. Le tableau 2 indique les effets qui sont pris en compte dans chaque modèle pour chaque paramètre de la grille de lecture ainsi que la « qualité » du traitement qui en est fait.

La grille de lecture retenue dans cette étude suggère qu'il paraît plus pertinent de se fonder sur un modèle d'équilibre général (de préférence hybride) si l'on souhaite évaluer les impacts macroéconomiques de la transition énergétique. Leur vision agrégée de l'ensemble des activités économiques, l'horizon de long terme qui les caractérise, l'approche qui permet d'intégrer différents scénarios politiques et, pour les modèles hybrides, certaines imperfections du marché, ainsi que la modélisation des différents paramètres clés (notamment la description fine des possibilités technologiques) sont autant d'avantages qui permettent une modélisation satisfaisante des interactions complexes entre économie, énergie et climat, à horizon lointain.

Les modèles macroéconométriques, bien utilisés, peuvent être utiles pour montrer les effets de transition. Par exemple, le travail de la DG Trésor illustre bien l'importance de la prise en compte des

contraintes de financement pour l'évaluation d'impacts à court et moyen terme. En revanche, leurs estimations des effets de long terme paraissent moins robustes que celles obtenues par les MEGC de par leurs fondements empiriques plutôt que théoriques.

Lecture critique des scénarios récents de transition énergétique

Nous considérons à présent les scénarios de transition énergétique récents pour lesquels une évaluation des impacts macroéconomiques (exprimés en termes d'effets sur le PIB et sur l'emploi) de ces scénarios a été réalisée et analysée. Dans cette perspective, quatre publications récentes paraissent pertinentes : l'étude du Trésor publiée en décembre 2010 ; le scénario de Greenpeace publié en janvier 2013 ; les scénarios de l'Ademe publiés en octobre 2013 ; et les travaux du Comité « Trajectoires 2020-2050 vers une économie sobre en carbone » publié en 2012 par le Centre d'analyse stratégique. Le tableau 1 (page 6) présente les principaux résultats de quatre études.

La majorité des études concluent à un effet positif des politiques de transition énergétique sur la croissance économique et sur l'emploi à moyen et long terme. Cet effet est particulièrement élevé dans les modèles macroéconométriques qui intègrent le progrès technique de manière endogène.

En effet, comme nous l'avons déjà expliqué plus haut, l'impact macroéconomique de la transition énergétique dépend fortement, d'une part, du type de mesures politiques envisagées et, d'autre part, de la manière dont est traité le progrès technique. Le tableau page 6 illustre ce propos puisque l'on voit que les modèles macroéconométriques à progrès technique endogène (Nemesis par exemple) obtiennent des effets macroéconomiques plus élevés que les autres modèles, en particulier lorsque le produit de la contrainte carbone est redistribué sous forme de subvention à l'innovation. Le même scénario évalué avec un modèle d'équilibre général hybride (Imaclip) donne des

résultats nettement moins optimistes, car ce modèle prend en compte un plus grand nombre de rigidités technico-économiques générant des effets d'inertie pesant sur la croissance (frictions associées aux manques d'investissement, aux comportements myopes des acteurs et aux effets de lock-in technologiques à court terme). La redistribution du produit de la taxe permet d'atténuer l'effet récessif de la taxe mais ne le compense pas complètement. L'effet final du scénario de transition énergétique sur l'économie est négatif.

Les écarts entre les scénarios soulignent bien que la manière de modéliser le progrès technique influe sur les estimations. Si le progrès technique est modélisé par le biais du stock de connaissances (comme c'est le cas dans Nemesis), le soutien de l'innovation qui accroît ce stock va affecter positivement le PIB, *via* un mécanisme équivalent à l'effet multiplicateur de l'investissement : plus on soutient l'innovation, plus on accroît le stock et plus on augmente le PIB. En revanche, lorsque la modélisation est plus sophistiquée et liée à des effets d'apprentissage, comme c'est le cas dans Imacsim, l'effet de l'innovation sur le PIB sera moins immédiat que dans le premier type de traitement et dépendra également d'autres paramètres entrant dans la courbe d'apprentissage qui définissent la pénétration des technologies innovantes²⁷.

De même, les modèles macroéconométriques obtiendront des effets positifs (au moins à court terme) sur l'économie dès lors que l'instrument choisi entraîne des dépenses publiques ou une redistribution soutenant la demande. C'est le cas notamment des modèles Threeme, Nemesis ou Mesange. La persistance à long terme d'effets fortement favorables avec le modèle Threeme vient probablement d'une structure plus fortement keynésienne, y compris à long terme.

La revue des exercices d'évaluation pointe également la place prépondérante accordée aux modèles macroéconométriques en France. Il s'agit là d'une particularité et la France se distingue clairement

des autres pays qui utilisent en général des MEGC pour évaluer les impacts macroéconomiques de politiques climatiques et/ou énergétiques²⁸. Leur capacité à décrire de façon rigoureuse un long terme qui n'est pas perturbé par une dynamique transitoire apparaît en effet comme un avantage décisif dans ce type d'exercice.

Recommandations

La modélisation économique constitue un outil d'aide à la décision. Elle peut aider à évaluer l'impact de la mise en place d'une politique énergétique.

Les différentes évaluations des impacts macroéconomiques de la transition énergétique que nous avons examinées divergent énormément et ne permettent pas de conclure de manière définitive sur l'effet de la transition énergétique sur la croissance et l'emploi.

Différentes visions de la macroéconomie se retrouvent dans les deux catégories de modèles qui sont utilisés pour évaluer ces impacts macroéconomiques : les modèles d'équilibre général qui adoptent une vision classique de l'économie, et les modèles macroéconométriques, qui suivent la théorie keynésienne.

Chaque type de modèle présente des avantages certains. L'atout principal des modèles d'équilibre général calculable réside dans la solidité des fondements théoriques assis sur la théorie macroéconomique. Les comportements macroéconomiques agrégés sont ainsi entièrement explicités par des mécanismes micro économiques, ce qui n'est pas le cas dans les modèles macroéconométriques. Cette assise théorique permet d'utiliser le modèle comme explicatif des mécanismes en vigueur : le cadre macroéconomique permet ensuite de tester la validité d'une spécification théorique en analysant les résultats de simulation.

Le réel avantage des modèles macroéconométriques sur les modèles d'équilibre général calculable repose sur leur capacité à décrire les déséquilibres à court et moyen termes.

Enfin, les modèles hybrides combinant les fondements théoriques des modèles d'équilibre général calculable à une description très fine des secteurs et des technologies permettent d'accroître la pertinence des résultats en tenant compte des spécificités de la réalité économique (imperfections des marchés), omises par souci de simplicité dans la théorie néo-classique sur laquelle repose les modèles d'équilibre général calculable.

Mais ces différentes approches présentent également des limites assez connues : les modèles d'équilibre général calculable supposent que l'économie est constamment en équilibre de plein-emploi, grâce à la flexibilité des prix et des salaires. Les sources de déséquilibres (*e.g.* chômage, inflation, manque de compétitivité, manque de rentabilité des entreprises) sont insuffisamment ou mal prises en compte. Les mécanismes sur lesquels reposent les modèles d'équilibre général calculable paraissent abstraits de par le manque de vérification empirique et éloignés des mécanismes économiques « réels ». Les modèles macroéconométriques quant à eux reproduisent mal les mécanismes économiques liés à l'offre, comme par exemple l'effet de la R&D sur la production²⁹, et reposent plus sur l'empirisme que sur des fondements théoriques robustes, au risque de mal décrire les réactions des agents à des politiques de rupture et leurs anticipations sur les politiques futures (critique de Lucas).

Dans l'exercice d'évaluation des effets de scénarios de transition énergétique, les modèles présentent des limites quant à la description des possibilités technologiques, et parfois des secteurs clés, comme l'énergie, le transport et le bâtiment. Les effets macroéconomiques positifs alors obtenus s'expliquent principalement par la substitution que la transition énergétique entraîne entre les facteurs

de production (substitution entre le travail et les autres facteurs) soit au sein de chaque branche, soit entre les branches.

Les évaluations actuelles des impacts macroéconomiques de la transition énergétique présentent donc des limites établies qui peuvent remettre en cause leur crédibilité, voire leur utilisation. Ce constat amène à formuler les huit recommandations suivantes :

1. Il apparaît nécessaire de réaliser uniquement des évaluations des impacts macroéconomiques à partir de modèles présentant un bouclage macroéconomique. Seuls ces modèles tiennent compte de l'ensemble des interactions entre les différentes variables qui affectent l'équilibre économique et permettent d'évaluer les effets nets sur l'emploi de la politique en question. L'effet brut ou direct n'est pas pertinent lorsqu'on souhaite avoir une idée de l'effet global de la politique sur l'emploi.
2. Il paraît indispensable que chaque étude explicite le scénario de référence du modèle. Notre analyse a souligné l'importance du scénario de référence qui conditionne en partie les résultats de l'estimation. Cela permettra d'apprécier à sa juste valeur l'effet de la transition énergétique sur l'économie.
3. Il serait également souhaitable de renforcer la compréhension des dynamiques macroéconomiques des modèles en réalisant des variantes stylisées du compte central pour comprendre les mécanismes qui opèrent, à paramètres énergétiques inchangés. Actuellement, les scénarios énergétiques (qui constituent la variante au scénario central) jouent sur de nombreux paramètres et il est difficile de distinguer l'effet lié aux mécanismes sous-jacents de la transition énergétique de celui lié aux mécanismes macroéconomiques du modèle.

4. Les contraintes de financement jouant un rôle clé dans l'appréciation des impacts macroéconomiques de la transition énergétique, il paraît essentiel de les expliciter clairement. Cela permettrait d'évaluer la vraisemblance de la politique de transition énergétique.
5. Afin de ne pas mal interpréter les résultats du fait des propriétés spécifiques de convergence des modèles, il convient de regarder la chronique des impacts macroéconomiques sur une période aussi longue que possible au lieu de se focaliser sur les impacts à une date précise. Cela permettrait également de mieux prendre en compte les effets transitoires et les délais d'ajustement de l'économie à l'introduction du signal-prix.
6. Il convient d'évaluer les effets de la transition énergétique sur la compétitivité de l'économie. Les différents canaux de la compétitivité doivent être mieux documentés, sachant que certaines mesures peuvent significativement l'affecter (*e.g.* soutien de l'innovation, baisse des cotisations pesant sur le travail).
7. Les interactions entre économie et environnement ne devraient pas être totalement ignorées. L'hypothèse usuelle de séparabilité, adoptée parce qu'elle facilite grandement la construction des modèles et la lecture des résultats qu'ils fournissent, ne donne qu'un aperçu incomplet de l'ensemble des comportements observés. En particulier, dans le scénario de référence, le laisser-faire pouvant provoquer des dommages ou contraindre les comportements et les coûts socio-économiques associés ne sont pas pris en compte.
8. Toute évaluation *ex ante* des impacts macroéconomiques d'un scénario de transition énergétique (ou de toute autre politique économique) devrait mobiliser des modèles de natures différentes afin de distinguer les effets économiques liés au modèle et ceux qui sont liés à la politique de transition énergétique. ■

Notes

- ¹ L'étude de la DG Trésor évalue l'impact macroéconomique du Grenelle de l'environnement. Il existe par ailleurs un certain nombre d'études qui s'appuient sur les modèles examinés ici, par exemple l'étude du Comité Energies 2050 qui évalue l'impact macroéconomique d'une baisse de la production d'électricité d'origine nucléaire (passage de 75% à 50%). On notera également l'étude réalisée par P. Quirion (2013) qui évalue les effets sur l'emploi d'un scénario de transition énergétique.
- ² P. Briard et al. (2010), « Impacts macroéconomiques du Grenelle de l'environnement », Document de travail de la DG Trésor n°2010/06.
- ³ « Scénario de transition énergétique », janvier 2013.
- ⁴ « Evaluation macroéconomique des visions énergétiques 2030-2050 de l'Ademe », Document technique, octobre 2013.
- ⁵ Centre d'analyse stratégique (2012), « Trajectoires 2020-2050 vers une économie sobre en carbone », Rapport n° 46.
- ⁶ On verra dans la suite que la définition de ce scénario de référence ne va pas de soi et qu'il s'avère crucial pour les évaluations.
- ⁷ Le coût marginal se définit comme l'augmentation de coût associée à la production d'une unité supplémentaire. Ici, il s'agit du coût associé à la réduction d'une unité supplémentaire de pollution, soit la définition du terme « abattement ».
- ⁸ Les mesures sans regrets sont des mesures visant à réduire les émissions de GES dont les coûts nets (i.e. coûts moins bénéfices) sont négatifs.
- ⁹ Finon, D. (2003), « Prospective énergétique et modélisation - Identification de pistes de progression méthodologique », Note au Conseil Scientifique de l'Institut Français de l'Energie.
- ¹⁰ Fishbone, L.G., G. A. Giesen, H. A. Goldstein, and H. A. Hymen (1983), User's Guide to MARKAL (BNL/KFA version 2.0), BNL-46319, Brookhaven National Laboratory, Upton, New York.
- ¹¹ Kouvaritakis, N., A. Soria, and S. Isoard (2000). "Endogenous Learning in World Post-Kyoto Scenarios: Application of the POLES Model under Adaptive Expectations", International Journal of Global Energy Issues, Vol. 14, No. 1-4, pp. 222-248.
- ¹² Développé par le laboratoire ERASME de l'ECP. Voir P. Zagamé et al., « The Nemesis Reference Manual ».
- ¹³ Développé conjointement par l'ADEME et l'OFCE. Voir F. Reynes, Y. Yeddir-Tamsamani et G. Callonnec (2011), « Presentation of the Three-Me model: multi-sector macroeconomic model for the evaluation of environmental and energy policy », Document de travail.
- ¹⁴ Elaboré par la Direction générale du Trésor, en collaboration avec l'INSEE, il s'agit du modèle de référence de l'administration lorsqu'il s'agit d'évaluer les impacts macroéconomiques d'une politique économique. Voir C. Allard-Prigent, C. Audenis, K. Berger, N. Carnot, S. Duchêne et F. Pesin (2002), « Présentation du modèle MESANGE - Modèle Économétrique de Simulation et d'Analyse Générale de l'Économie », Document de travail du Ministère de l'économie, des finances et de l'industrie.
- ¹⁵ Oxford Economic Forecasting (2006), « DTI Energy price scenarios in the Oxford Models », mai 2006.
- ¹⁶ « Train de mesures pour la réalisation des objectifs fixés par l'Union européenne pour 2020 en matière de changement climatique et d'énergies renouvelables », Document de travail SEC(2008)85.
- ¹⁷ Voir A. Bernard et M. Vielle (1998), « La structure du modèle Gemini-E3 », Economie et Prévision, n° 136, pp. 19-32.

- ¹⁸ Centre d'analyse stratégique (2009), « La valeur tutélaire du carbone – Rapport de la Commission présidée par Alain Quinet », La documentation française.
- ¹⁹ Voir R. Crassous, J.-C. Hourcade, O. Sassi, V. Gitz, S. Mathy et M. Hamdi-Cherif (2006), « Imaclim-R – a modeling framework for sustainable development issues », Document de travail du CIRED.
- ²⁰ A.S. Manne et R.G. Richels (2004), « MERGE : An integrated assessment model for global climate change ».
- ²¹ Barker, T., H. Pan, J. Köhler, R. Warren, et S. Winne (2006), « Decarbonizing the Global Economy with Induced Technological Change: Scenarios to 2100 using E3MG », The Energy Journal.
- ²² Etats-Unis, Union européenne, Japon, Russie, Eurasie, Chine, Inde, Moyen-Orient, Afrique, Amérique latine, Autres pays développés, Reste du monde. Voir William D. Nordhaus (2010), « Economic aspects of global warming in a post-Copenhagen environment », Proceedings of the National Academy of Sciences (Etats-Unis).
- ²³ Ces mesures peuvent être déclenchées par des normes réglementaires.
- ²⁴ Ces résultats seront commentés ultérieurement. Pour plus de détails, voir le rapport « Trajectoires 2020-2050 vers une économie sobre en carbone » publié par le Centre d'analyse stratégique en 2012.
- ²⁵ P. Aghion et P. Howitt (1992), « A model of growth through creative destruction », *Econometrica*, Vol. 60, n°2, pp. 323-351.
- ²⁶ Les externalités de connaissance se définissent comme des transferts de connaissance entre agents économiques.
- ²⁷ Dans Imaclim, le processus d'apprentissage est endogène et dépend du coût en capital des technologies (qui décroît avec le temps) et des rendements qui augmentent avec l'investissement cumulé. Les courbes d'apprentissage sont propres à chaque technologie et sont issues de la littérature.
- ²⁸ Voir par exemple les travaux de l'Energy Modeling Forum (EMF), forum international coordonné par l'Université de Stanford qui regroupe des chercheurs du monde entier pour partager et échanger sur la politique énergétique et le changement climatique. Site internet : <http://emf.stanford.edu/>
- ²⁹ Cette critique vaut principalement pour les modèles macroéconométriques dans lesquels le progrès technique est intégré de manière exogène.