

La transition énergétique vue par les modèles macroéconomiques

Baptiste Boitier
Gaël Callonnec
Pierre Douillard
Anne Épaulard
Frédéric Gherzi
Emmanuelle Masson
Sandrine Mathy



FRANCE STRATÉGIE
ÉVALUER. ANTICIPER. DÉBATTRE. PROPOSER.

Les documents de travail de France Stratégie présentent les travaux de recherche réalisés par ses experts, seuls ou en collaboration avec des experts extérieurs. L'objet de leur diffusion est de susciter le débat et d'appeler commentaires et critiques. Les documents de cette série sont publiés sous la responsabilité éditoriale du commissaire général. Les opinions et recommandations qui y figurent engagent leurs auteurs et n'ont pas vocation à refléter la position du Gouvernement.

Sommaire

Résumé	3
Introduction	7
I Quels modèles pour l'évaluation macroéconomique de la transition énergétique ?	9
1.1. Trois modèles macroéconométriques.....	9
1.2. Un modèle de type équilibre général calculable	10
II Analyse des simulations de chocs sur le prix de l'énergie	13
2.1. L'effet sur l'équilibre macroéconomique	13
2.2. Impact sur les émissions de CO ₂ et les consommations d'énergie	16
Conclusion	19
Annexes	
Annexe 1 – L'énergie dans le modèle Mésange.....	21
Annexe 2 – L'énergie dans le modèle Némésis.....	23
Annexe 3 – L'énergie dans le modèle ThreeME.....	26
Annexe 4 – L'énergie dans le modèle Imaclim-R France	29

La transition énergétique vue par les modèles macroéconomiques

Baptiste BOITIER
Gaël CALLONNEC
Pierre DOUILLARD
Anne ÉPAULARD
Frédéric GHERSI
Emmanuelle MASSON
Sandrine MATHY¹

Résumé

La transition énergétique et la lutte contre le changement climatique représentent des coûts et des opportunités conséquents à l'échelle de l'économie. Les modèles macroéconomiques permettent de comparer l'effet des différentes politiques mises en œuvre pour déclencher et accompagner cette transition, exercice réalisé ici dans le cas de la France. Utilisés non seulement pour mesurer l'effet de la transition énergétique sur la croissance à long terme, ils aident aussi à identifier d'éventuelles politiques conjoncturelles ou structurelles susceptibles de faciliter l'absorption par l'économie des changements significatifs qu'implique cette transition. Pour contribuer à une meilleure compréhension de ces modèles, France Stratégie a lancé un exercice de simulation de chocs sur le secteur énergétique, réalisé avec les modèles macroéconomiques disponibles pour l'économie française. Quatre équipes de modélisation² ont participé à ces simulations qui visent à interpréter les divergences de résultats des différents modèles comme une façon d'identifier les mécanismes économiques cruciaux qui sont à l'œuvre dans la transition énergétique.

Sont analysés les résultats de ces simulations de chocs sur les variables énergétiques obtenus avec chacun des modèles. Les chocs envisagés successivement sont une hausse du prix des énergies fossiles, puis l'introduction d'une taxe carbone et enfin celle d'une taxe sur l'électricité.

Il ne s'agit pas de simuler des politiques économiques susceptibles d'être mises en place mais plutôt d'observer les impacts sur l'économie française de chocs « simples ».

Deux types de résultats sont présentés ici : les impacts sur l'équilibre macroéconomique (PIB, emploi, salaires, prix) et ceux sur les grandeurs énergétiques (consommation

¹ Baptiste BOITIER, SEURECO ; Gaël CALLONNEC, ADEME ; Pierre DOUILLARD, France Stratégie (Département développement durable) ; Anne ÉPAULARD, Université Paris Dauphine et France Stratégie ; Frédéric GHERSI, CNRS, CIREC ; Emmanuelle MASSON, direction général du Trésor ; Sandrine MATHY, PACTE-EDDEN.

² La direction générale du Trésor (modèle Mésange développé avec l'Insee), l'ADEME (modèle ThreeME développé avec l'OFCE), SEURECO (modèle Némésis), le CIREC et EDDEN (modèle Imacim-R France).

d'énergie, intensité énergétique, émissions de CO₂).

Les principaux enseignements se résument ainsi :

- les modèles de type macroéconométrique (Mésange, Némésis, ThreeME) s'accordent sur l'ampleur qu'aura une hausse du prix de l'énergie sur l'activité économique. L'impact négatif d'un renchérissement de l'énergie se fait rapidement sentir et peine à se résorber, même à long terme. Le modèle Imaclim-R induit des dynamiques différentes. Si à moyen terme (dix ans) ses résultats se rapprochent de ceux des autres modèles, les effets sont plus pénalisants à court terme et plus favorables à long terme.
- Les effets sur l'emploi, le chômage et les salaires varient d'un modèle à l'autre. La fluidité du marché du travail apparaît ainsi cruciale pour le partage, au sein de la population, des effets d'une hausse du prix de l'énergie et pour l'efficacité du recyclage des montants d'une éventuelle taxe sur l'énergie.
- Les réductions des émissions de CO₂ générées par les hausses du prix de l'énergie sont remarquablement proches d'un modèle à l'autre. Par exemple, une taxe carbone d'un montant de l'ordre de 1 % du PIB en valeur *ex ante* se traduit à long terme par une diminution des émissions de CO₂ de l'ordre de 15 % par rapport à la trajectoire de référence dans les quatre modèles. Le rythme de baisse des émissions diffère d'un modèle à l'autre mais les quatre modèles s'accordent sur le fait qu'au moins 50 % de cette réduction est obtenue au bout de trois ans.
- En revanche, les réponses en termes de consommation d'énergie finale (et d'intensité énergétique) diffèrent énormément d'un modèle à l'autre. Pour certains modèles (ThreeMe, Imaclim-R France), la réduction des émissions de CO₂ est liée à celle de l'intensité énergétique qui diminue d'environ 10 % à long terme, pour d'autres (Némésis) la réduction des émissions de CO₂ provient essentiellement d'une substitution entre des énergies plus ou moins polluantes (l'intensité énergétique ne diminue que de 3 % à long terme).

Ces résultats contrastés révèlent des hypothèses technologiques différentes d'un modèle à l'autre et déterminantes pour la formulation de recommandations de politiques économiques qui favorisent la transition énergétique.

Compte tenu de l'effet persistant des hausses du prix de l'énergie sur l'économie décrit par les modèles, le recyclage des montants prélevés par une taxe sur l'énergie est déterminant. La littérature empirique³ conclut usuellement que le recyclage devrait favoriser l'offre de biens et services et/ou de travail (allègements de charges, d'impôts, aides à l'investissement en efficacité énergétique ou soutien à la R & D) plutôt que la demande si l'on veut compenser les effets durablement négatifs de la hausse de la taxation sur l'énergie. Cela n'est pas incompatible avec une compensation de la perte de pouvoir d'achat liée au renchérissement de l'énergie que subiraient les ménages les plus modestes et/ou en

³ Voir les communications et présentations faites lors du Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change's Public Finance Workshop en mai 2013.
<http://www.mcc-berlin.net/events/events/article/public-finance-workshop.html>

précarité énergétique.

Ces enseignements sur l'impact des hausses du prix de l'énergie sur l'économie, l'importance à accorder au recyclage des montants levés par la fiscalité sur l'énergie et le rôle clé du fonctionnement du marché du travail sont conformes à ceux obtenus par d'autres modèles pour d'autres régions/économies⁴. Il est toutefois difficile de comparer l'ampleur des effets obtenus sur des économies dont le *mix* énergétique est différent de celui de la France. Ce sera l'objet de travaux futurs.

Dernière conclusion de cette comparaison : il y a à l'heure actuelle trop d'incertitudes pour analyser la dimension macroéconomique de la transition énergétique et des politiques d'accompagnement en s'appuyant sur un seul modèle. C'est l'utilisation conjointe de plusieurs modèles qui permet d'encadrer le champ des possibles, notamment en termes de possibilité de substitution énergétique et de représentation du progrès technique. Cette utilisation de plusieurs modèles permet aussi de distinguer les politiques d'accompagnement à mettre en œuvre dans tous les cas, de celles qui dépendent davantage de l'apparition (ou non) de nouvelles technologies et de leur rentabilité.

Mots clés : modélisation macroéconomique ; transition énergétique.

⁴ Commission mondiale sur l'économie et le climat, *New Climate Economy Report* (septembre 2014). <http://newclimateeconomy.report/>

La transition énergétique vue par les modèles macroéconomiques

Baptiste BOITIER
Gaël CALLONNEC
Pierre DOUILLARD
Anne ÉPAULARD
Frédéric GHERSI
Emmanuelle MASSON
Sandrine MATHY⁵

Introduction

La transition énergétique et la lutte contre le changement climatique représentent des coûts et des opportunités conséquents à l'échelle de l'économie. Les modèles macroéconomiques permettent de comparer les effets des différentes politiques mises en œuvre pour déclencher et accompagner cette transition. Ces modèles non seulement mesurent l'impact de la transition sur la croissance à long terme, mais aussi identifient d'éventuelles politiques conjoncturelles ou structurelles susceptibles de faciliter l'absorption par l'économie des changements significatifs qu'implique cette transition.

Pour contribuer à une meilleure compréhension du fonctionnement des modèles macroéconomiques disponibles pour cet exercice d'évaluation, France Stratégie a lancé, à l'automne 2014, un exercice de simulation de chocs sur le secteur énergétique réalisé avec les modèles macroéconomiques de l'économie française.

Quatre équipes de modélisation ont participé à cet exercice : la direction générale du Trésor (modèle Mésange développé avec l'Insee), l'ADEME (modèle ThreeME développé avec l'OFCE), SEURECO (modèle Némésis), le CIRED et EDDEN (modèle Imacim-R France)

L'analyse présentée ici est fondée sur les résultats des simulations fournis par chacun de ces modèles. Ont été envisagés successivement une hausse du prix des énergies fossiles, l'introduction d'une taxe carbone et celle d'une taxe sur l'électricité. Il ne s'agit pas de simuler des politiques économiques susceptibles d'être mises en place mais d'observer les impacts sur l'économie française de chocs « simples », en s'intéressant ici à deux catégories de résultats : les effets sur l'équilibre macroéconomique (PIB, emploi, salaires, prix) et ceux sur les grandeurs énergétiques (consommation d'énergie, intensité énergétique, émissions de CO₂).

⁵ Baptiste BOITIER, SEURECO ; Gaël CALLONNEC, ADEME ; Pierre DOUILLARD, France Stratégie (Département développement durable) ; Anne ÉPAULARD, Université Paris Dauphine et France Stratégie ; Frédéric GHERSI, CNRS, CIRED ; Emmanuelle MASSON, direction général du Trésor ; Sandrine MATHY, PACTE-EDDEN.

Le document de travail présente rapidement les différents modèles utilisés pour cet exercice. Puis il compare les résultats obtenus concernant l'impact du renchérissement des prix de l'énergie sur l'équilibre macroéconomique (le PIB, l'emploi, l'inflation). Il examine ensuite l'effet du renchérissement des prix de l'énergie sur les grandeurs énergétiques (les émissions de CO₂, l'intensité énergétique et la consommation d'énergie finale). En conclusion, sont comparés les principaux enseignements tirés de cet exercice réalisés avec des modèles français avec ceux obtenus à l'aide des modèles internationaux.

I Quels modèles pour l'évaluation macroéconomique de la transition énergétique ?

Les trajectoires de transition énergétique peuvent être simulées par des modèles « bottom-up » (ou technico-économiques)⁶ qui reposent sur un traitement détaillé du système énergétique et permettent de choisir les technologies les moins chères pour atteindre une cible énergétique. Cependant ces modèles ne prennent pas en compte les comportements de l'ensemble des acteurs en fonction des prix et ignorent le plus souvent le bouclage macroéconomique, notamment l'impact de la transition énergétique sur les grandeurs macroéconomiques : la consommation totale des ménages, l'emploi, les salaires, la balance commerciale.

Ces impacts sont évidemment mieux décrits dans les modèles macroéconomiques dont on peut distinguer deux catégories⁷ : d'une part la famille des modèles en équilibre général calculable (EGC) y compris leurs versions dynamiques (modèles à générations imbriquées, modèles DSGE⁸) et, d'autre part, les modèles macroéconométriques. Si ces modèles décrivent bien les interactions entre l'ensemble des grandeurs économiques, ils sont usuellement moins précis sur les techniques disponibles. Toutefois, certains décrivent les secteurs productifs avec une finesse telle qu'ils parviennent à appréhender des effets différenciés de la transition énergétique selon les secteurs. La dimension sectorielle de la transition énergétique est importante et ne peut en effet être ignorée : tous les secteurs ne seront pas impactés de la même manière, certains seront pénalisés par un renchérissement des prix de l'énergie, d'autres bénéficieront de gains d'investissements. À l'exception du modèle Mésange, les modèles macroéconomiques utilisés ici proposent des désagrégations sectorielles fines et incorporent des approches micro-économiques qui diffèrent selon le type de secteur considéré (producteur d'énergie, gros utilisateur d'énergie comme les transports...).

1.1. Trois modèles macroéconométriques

Parmi les modèles disponibles pour évaluer les politiques énergétiques françaises et utilisés ici, trois sont des modèles macroéconométriques.

- Le modèle Mésange⁹, développé par la direction générale du Trésor et l'Insee, se caractérise, comme tous les modèles macroéconomiques, par une dynamique

⁶ Par exemple, le ministère de l'Écologie a utilisé pour la construction de scénarios prospectifs énergie-climat à l'horizon 2035 deux modèles technico-économiques développés par Enerdata : Med-Pro Environnement (modèle national de prospective de la demande à long terme) et POLES (prospective à long terme de l'équilibre offre/demande au niveau mondial).

⁷ Pour une description des différents types de modèles macroéconomiques, le lecteur peut consulter, Épaulard A., Laffargue J.-P. et Malgrange P. (2008), « La nouvelle modélisation macroéconomique appliquée à l'analyse de la conjoncture et à l'évaluation des politiques économiques », *Économie et Prévision* n°183-184.

⁸ Les modèles DSGE (Dynamic Stochastic General Equilibrium ou modèles d'équilibre général dynamique stochastique) sont encore rarement utilisés pour évaluer des politiques énergie-climat. Voir un exemple européen dans Bukowski M. (2014), "On the endogenous directed technological change in multisector DSGE Model: The Case of Energy and Emission E-Ciency", Neujobs Working Paper N°D3.8, janvier.

⁹ Modèle Économétrique de Simulation et d'ANalyse Générale de l'Économie.

keynésienne à court terme et un équilibre de long terme déterminé par des facteurs d'offre. Ce modèle à trois secteurs n'isole pas formellement la branche énergie mais distingue les consommations d'énergie des ménages et des entreprises ainsi que les importations énergétiques. Ainsi, les équations de consommation et d'importation prennent explicitement en compte les prix de l'énergie relativement aux autres prix. Un modèle sectoriel est utilisé en parallèle pour intégrer les possibilités de substitution entre énergies. Une présentation plus complète du modèle est donnée à l'annexe 1.

- Le modèle Némésis¹⁰ développé par ERASME-SEURECO est fondé sur une structure en trente secteurs. Chaque secteur productif est modélisé par une fonction de production de type CES (*Constant elasticity of substitution*) qui décrit les possibilités de substitution entre facteurs de production au sens large (consommation intermédiaires, travail qualifié, travail peu qualifié, capital, énergie) avec un « emboîtement » des niveaux de substitution entre facteurs (graphique 1). Némésis contient par ailleurs une modélisation spécifique du secteur de la production énergétique qui décrit des possibilités de substitution entre d'une part l'électricité et d'autre part, cinq autres sources d'énergie primaire (le pétrole, le gaz, le charbon, énergies renouvelables hors électricité et les autres énergies). La demande d'énergie des ménages résulte aussi de divers arbitrage qui dépendent en partie du prix de l'énergie. Toutes choses égales par ailleurs, une augmentation du prix de l'énergie réduira la demande de voitures et d'essence au profit des transports en commun. Une présentation plus complète du modèle est donnée dans l'annexe 2 (voir notamment graphique A2.1).
- Le modèle ThreeME¹¹ est développé conjointement par l'OFCE¹² et l'ADEME. Il comprend vingt-quatre secteurs de production. Le secteur de l'énergie est lui-même divisé en dix-sept sous-secteurs, celui des transports en cinq sous-secteurs. Les fonctions de production sont également de type CES avec substitution énergie, travail et capital ainsi qu'entre énergies. La demande d'énergie des ménages est modélisée par des équations spécifiques qui tiennent compte d'un arbitrage entre différents types de logements et de voitures en fonction de leur efficacité énergétique. Dans ce cadre, une augmentation des prix de l'énergie incite les ménages à investir dans des logements et des voitures plus économes en énergie ce qui se répercute *in fine* sur leur consommation d'énergie. Une présentation plus complète du modèle est donnée dans l'annexe 3.

1.2. Un modèle de type équilibre général calculable

- Il s'agit du modèle Imacim-R France, développé par le CIRED¹³ et porté aujourd'hui aussi par le PACTE¹⁴-EDDEN¹⁵. L'économie est désagrégée en treize secteurs dont cinq secteurs énergétiques et quatre dans les transports. Le secteur résidentiel, le secteur des transports, les différents secteurs de production et les trois vecteurs

¹⁰ New Econometric Model of Evaluation by Sectoral Interdependency and Supply.

¹¹ Modèle macroéconomique multisectoriel d'évaluation des politiques énergétiques et environnementales.

¹² Observatoire français des conjonctures économiques.

¹³ Centre international de recherche sur l'environnement et le développement.

¹⁴ Politiques publiques, Action politique, Territoires (université de Grenoble).

¹⁵ Économie du développement durable et de l'énergie.

énergétiques (électricité, gaz, combustible liquide) sont modélisés en tenant compte de la composition technologique disponible et de la rentabilité relative de chaque solution. S'il se rapproche des modèles EGC, il en diffère dans le sens où la dynamique est donnée par une succession d'équilibres statiques qui tiennent compte de multiples imperfections de marché : inertie des équipements, allocation imparfaite des investissements, routine de comportement des agents économiques. Une présentation plus complète du modèle est donnée dans l'annexe 4.

Ces différents modèles ont été utilisés dans le cadre de plusieurs exercices d'évaluation des politiques énergétiques françaises. Le projet de loi sur la transition énergétique a ainsi fait l'objet en juillet 2014 d'une première évaluation macroéconomique réalisée à l'aide du modèle ThreeME, en collaboration avec le Commissariat général au développement durable. L'exercice a été poursuivi par le ministère de l'Écologie, du développement durable et de l'énergie qui prépare la stratégie nationale bas carbone (SNBC) et la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE), deux nouveaux outils de pilotage de la transition énergétique prévus dans la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte. Une évaluation macroéconomique est réalisée en parallèle associant à nouveau le modèle ThreeME mais aussi le modèle Némésis couplé avec des modèles technico-économiques (POLES et MED-PRO).

Plusieurs de ces modèles sont également utilisés pour des exercices de simulation menés au niveau international. Némésis ayant été développé à l'échelle européenne, il est régulièrement employé par la Commission européenne. Imacim-R dans sa version mondiale est utilisé à l'échelle internationale et ses simulations font partie de la base de données de scénarios AR5 du GIEC¹⁶. Enfin, ThreeME fait l'objet d'adaptations notamment auprès de pays émergents (Mexique, Indonésie).

L'exercice de comparaison mené ici se situe en amont de ces évaluations qui combinent un nombre important de mesures. Il ne concerne en effet que des chocs relativement simples afin d'isoler précisément ce qui, dans les résultats des modèles, s'explique par les hypothèses spécifiques à l'un ou l'autre modèle et/ou par le niveau de désagrégation sectoriel retenu.

¹⁶ Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

II Analyse des simulations de chocs sur le prix de l'énergie

2.1. L'effet sur l'équilibre macroéconomique

Un relatif consensus quant à l'effet de la hausse du prix de l'énergie sur l'activité

L'impact macroéconomique de chocs touchant le prix de l'énergie et les taxes sur l'utilisation de l'énergie est similaire, quel que soit le modèle de type macroéconométrique (Mésange, Némésis, ThreeME) avec lequel il est mesuré, du moins pour l'effet sur l'activité économique, même si Némésis tend à avoir des effets un peu plus élevés lorsqu'il s'agit d'une taxe (tableau 1).

Un modèle d'équilibre général calculable « hybride » et en marchés imparfaits comme Imaclim-R France induit des dynamiques différentes. Si à moyen terme (dix ans), ses résultats se rapprochent de ceux issus des autres modèles, les effets à court et à long terme se distinguent. La modélisation technique explicite induit des rigidités à court terme plus fortes que celles décrites par les modèles macroéconométriques, et par suite un effet plus négatif à court terme sur l'économie. À long terme, en revanche, dans le modèle Imaclim-R une hausse du prix de l'énergie aide à lever certains blocages, ce qui allège *in fine* le poids sur l'économie.

L'impact macroéconomique d'une hausse du prix de l'énergie est principalement déterminé par les possibilités de substitution à l'énergie d'autres facteurs de production et d'autres biens de consommation. De ce point de vue, si les modèles comparés ici se distinguent bien par des possibilités de substitution plus ou moins élevées (nous reviendrons sur ce point ci-après), ces possibilités restent dans tous les cas relativement limitées. Dans le présent exercice, aucun des modèles macroéconométriques français n'envisage le cas où une hausse très importante du prix de l'énergie fossile déclencherait de très larges possibilités de substitution aux consommations d'énergie et/ou un changement technologique radical qui favoriserait des technologies économes en énergie au-delà de ce qui est usuellement retenu dans de tels modèles. C'est conforme à ce qu'enseignent les travaux empiriques disponibles sur les valeurs des élasticités de substitution entre l'énergie et les autres facteurs¹⁷. Ces possibilités apparaissent toutefois plus étalées dans le temps avec le modèle Imaclim-R France, ce qui explique que les chocs simulés ont des effets moins récessifs à long terme.

Dans tous les modèles économétriques (Mésange, ThreeME, Némésis), les effets des hausses permanentes de prix et/ou de taxes sur l'énergie apparaissent rapidement et ne s'atténuent pas dans le temps. En l'absence de mesures redistributives qui ne faisaient pas partie de la simulation, le multiplicateur de long terme est proche de 1 : ceci signifie qu'une hausse des prélèvements d'un montant de 1 % du PIB se traduit, avant recyclage des recettes de la taxe, par une activité inférieure de 1 % en moyenne. Cela suggère que dans le cas où il s'agit d'une taxe, le recyclage des recettes de la taxe dans l'économie ne parviendrait à contrebalancer les effets récessifs qu'à condition soit qu'il réduise les coûts unitaires de production, soit qu'il augmente l'investissement productif (plutôt que la consommation ou l'investissement peu productif). En effet, dans les modèles macroéconomiques, l'impact d'un soutien, même permanent, à la demande (consommation

¹⁷ Hassler J., Kruselly P. et Olovsson C. (2012), "Energy-Saving Technical Change", NBER Working Paper n° 18456. <http://www.nber.org/papers/w18456>

ou investissement peu productif) s'estompe progressivement *via* des effets d'éviction et ne parvient donc pas à contrebalancer le choc d'offre permanent.

Pour autant, le recyclage des recettes de la taxe dans l'économie peut prendre des formes de soutien à la baisse des coûts de production et à l'essor de l'investissement productif : allègements de cotisations sociales (patronales ou salariales), allègements d'impôts sur les facteurs de production tels l'impôt sur les sociétés ou l'impôt sur les revenus du travail ou du capital. Un recyclage à travers le soutien à l'efficacité énergétique ou à la recherche permettrait également d'accompagner efficacement la mise en œuvre de la taxe carbone. De même, le recyclage pourrait limiter, voire contrebalancer, l'aggravation des inégalités qui résulteraient des politiques climatiques. Les avantages et les inconvénients de chaque solution n'ont pas été étudiés ici.

Dans le modèle Imacim-R, la dynamique est radicalement différente : les chocs de prix envisagés sont beaucoup plus coûteux pour l'économie à court terme, mais ils sont mieux absorbés à long terme. En termes de gestion macroéconomique, des politiques d'accompagnement conjoncturel apparaissent alors davantage nécessaires.

Des divergences sur l'effet sur l'emploi dues à la modélisation du marché du travail

Si l'ampleur des effets sur l'activité des chocs étudiés est similaire d'un modèle à l'autre, il n'en va pas de même pour les effets sur l'emploi et les salaires. Deux cas se distinguent. Dans le cas où la dynamique des salaires dépend du niveau de chômage (« courbe de Philips »), l'effet dépressif sur l'économie d'une hausse du prix de l'énergie ou d'une taxe sur l'énergie fossile se traduit à moyen et long terme par une modération salariale qui limite les effets négatifs sur l'emploi. Dans le cas où le modèle théorique sous-jacent à la formation des prix et des salaires est un modèle « WS – PS¹⁸ », le chômage d'équilibre augmente du fait de la hausse de la taxe sur l'énergie ce qui se traduit par une progression du chômage et des salaires plus élevée. Le choix de modélisation adopté pour la formation des salaires conduit à des résultats relativement différents quant à l'impact d'une taxation de l'énergie sur l'emploi, les salaires et le chômage. Toutes choses égales par ailleurs, un choc sur le prix de l'énergie se traduit par une moins forte hausse du chômage lorsque le marché du travail est flexible et que la main-d'œuvre dispose des compétences nécessaires aux emplois créés par la transition énergétique, ce dernier point étant mal pris en compte dans les modèles qui font l'hypothèse d'une forte mobilité du travail entre secteurs. Symétriquement, toutefois, les effets expansifs sur l'emploi d'une baisse d'impôts ou de charges seront plus importants avec une WS – PS qu'avec une courbe de Phillips, comme l'attestent les simulations réalisées avec Courbe de Phillips ou Wage setting, des effets d'une baisse permanente des cotisations sociales (cf. tableau 1).

Les simulations montrent que le multiplicateur (positif) d'une baisse des charges sociales peut être supérieur, en valeur absolue, au multiplicateur (négatif) d'une hausse de la taxe carbone. Auquel cas, le recyclage des recettes carbone sous forme de diminution des cotisations sociales favorise l'émergence d'un double dividende, écologique et économique.

¹⁸ « Wage-setting, price-setting ».

Des effets sur les échanges extérieurs difficiles à prendre en compte dans les modèles nationaux

Au niveau international, dans le cas où les partenaires commerciaux ne mènent pas tous la même politique de taxation de l'énergie, l'impact des taxes sur l'énergie fossile est d'autant plus fort que les exportations et les importations de biens (non énergétiques) et de services réagissent fortement aux prix. Ainsi, une économie bénéficiant d'une compétitivité « hors prix » importante du fait de la qualité de ses produits, ou une économie spécialisée dans certaines niches peu concurrentielles, est davantage à même d'instaurer des taxes sur l'énergie indépendamment des mesures prises par les pays partenaires. Ce point ne fait pas l'objet de chiffrage dans ce document de travail.

Tableau 1
Impacts des chocs simulés sur l'équilibre macroéconomique de la France

	PIB*				Emplois salariés (milliers)				Salaires réels*				Prix à la consommation*			
	3 ans	5 ans	10 ans	LT**	3 ans	5 ans	10 ans	LT**	3 ans	5 ans	10 ans	LT**	3 ans	5 ans	10 ans	LT**
Hausse permanente de 10% des prix des énergies fossiles																
Mésange	-0,2	-0,2	-0,3		-30	-60	-50						0,6	0,7	0,6	
ThreeME WS	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-30	-50	-60	-60	-0,3	-0,3	-0,4	-0,3	0,7	0,9	1,0	1,1
ThreeME Ph	-0,3	-0,3	-0,3	-0,2	-30	-50	-70	-40	-0,1	-0,1	-0,2	-0,7	0,8	1,1	1,4	0,5
Némésis	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-30	-30	-30	-30	-0,3	-0,2	-0,2	-0,2	0,5	0,5	0,5	0,4
Imaclim R	-0,7	-0,6	-0,4	0,0	-90	-90	-80	-30	-0,6	-0,5	-0,5	-0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Hausse permanente de 100% des prix des énergies fossiles																
ThreeME WS	-2,7	-2,7	-2,5	-2,4	-290	-430	-490	-510	-2,3	-2,8	-3,0	-2,8	6,3	7,8	9,2	9,2
ThreeME Ph	-2,7	-2,7	-2,7	-2,2	-310	-480	-600	-330	-1,2	-1,1	-1,4	-5,3	6,9	9,4	12,5	4,7
Némésis	-2,4	-2,5	-2,4	-2,3	-250	-300	-300	-290	-2,3	-2,1	-2,0	-1,9	4,3	4,8	4,5	4,0
Imaclim R	-4,8	-4,3	-3,2	-0,4	-650	-600	-630	-260	-3,9	-3,8	-4,5	-4,6	4,8	4,7	4,6	4,7
Hausse permanente de la taxe carbone (équivalente à 1% du PIB en valeur ex ante)																
Mésange	-0,6	-0,7	-0,7	-0,7	-150	-140	-110	-110	-0,8	-1,1	-1,4	-1,7	1,8	1,8	1,9	1,4
ThreeME WS	-0,8	-0,8	-0,7	-0,9	-90	-130	-150	-200	-0,7	-0,9	-1,0	-1,1	1,6	1,9	2,2	2,6
ThreeME Ph	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-100	-150	-190	-150	-0,3	-0,3	-0,5	-1,9	1,8	2,4	3,1	1,4
Némésis	-1,2	-1,2	-1,3	-1,3	-130	-150	-160	-170	-1,2	-1,1	-1,2	-1,3	3,1	3,4	3,4	3,3
Imaclim R	-2,0	-1,8	-1,2	-0,1	-240	-240	-220	-80	-0,9	-0,9	-0,9	-0,6	1,3	1,3	1,3	1,3
Hausse permanente de la taxe sur l'électricité (équivalente à 1% du PIB en valeur ex ante)																
ThreeME WS	-0,9	-0,8	-0,7	-0,9	-110	-140	-140	-190	-0,7	-0,9	-0,9	-1,1	1,6	1,8	2,0	2,5
ThreeME Ph	-0,9	-0,8	-0,8	-0,8	-120	-160	-180	-140	-0,3	-0,3	-0,5	-1,8	1,8	2,3	2,9	1,4
Némésis	-1,4	-1,5	-1,4	-1,4	-80	-110	-110	-110	-1,6	-1,5	-1,4	-1,3	3,3	4,0	4,2	4,1
Imaclim R	-1,3	-1,2	-1,1	-0,3	-210	-200	-180	-60	-1,0	-1,0	-1,1	-0,8	0,8	0,8	0,8	0,6
Baisse permanente des cotisations employeurs (équivalente à 1% du PIB en valeur ex ante)																
Mésange	0,9	1,1	1,2	1,4	270	270	260	280	1,2	1,5	2,0	2,4	-1,3	-1,6	-1,9	-2,0
ThreeME WS	1,0	1,1	1,1	1,0	170	230	260	260	1,1	1,4	1,6	1,5	-1,2	-1,5	-1,5	-1,0
ThreeME Ph	1,0	1,2	1,2	0,7	190	270	340	130	0,4	0,5	0,8	2,9	-1,7	-2,4	-3,2	1,7
Imaclim R	1,1	1,2	1,2	0,8	220	220	210	70	0,8	0,9	0,9	0,9	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8

* Écart au compte central, en %.

** À 35 ans pour ThreeME et Imaclim-R ; 15 ans pour Némésis.

Versions de ThreeME : WS = avec équation des salaires Wage-Setting ; Ph = avec courbe de Phillips.

Source : simulation des auteurs.

2.2. Impact sur les émissions de CO₂ et les consommations d'énergie

Une convergence des modèles quant à l'impact d'une hausse des prix de l'énergie sur les émissions de CO₂

Les simulations des différents modèles¹⁹ montrent qu'une taxe carbone équivalent à un montant de 1 % du PIB *ex ante*²⁰ se traduit par une réduction des émissions de CO₂ de près de 10 % à un horizon de cinq ans et de 15 % en moyenne à long terme. Si la taxe porte sur la consommation d'électricité, toujours pour un montant de 1 % du PIB *ex ante*, les réductions des émissions de CO₂ sont moindres et différentes d'un modèle à l'autre : à long terme la baisse est de 5 % dans ThreeME, 7 % dans Imaclim-R France et négligeable dans Némésis. Les différences entre modèles s'expliquent par les hypothèses retenues dans le *mix* électrique du scénario tendanciel qui peut varier d'un modèle à l'autre.

Mais des divergences sur les modalités de cette réduction

Par ailleurs, la façon dont la réduction des émissions de CO₂ est obtenue est radicalement différente d'un modèle à l'autre. Pour le modèle ThreeME, la réduction des émissions de CO₂ résulte essentiellement d'une plus grande efficacité énergétique (dans les processus de production ou en lien avec une moindre consommation d'énergie pour les ménages) dans la mesure où le *mix* énergétique est supposé ici en grande partie exogène²¹ (annexe 3, description du modèle ThreeMe). Pour le modèle Némésis, la réduction des émissions de CO₂ se fait *via* une recomposition endogène du *mix* énergétique (annexe 2, description du modèle Némésis). Par exemple, dans le cas d'une taxe carbone, la baisse des émissions de CO₂ est obtenue par celle de l'intensité énergétique qui recule de 11 % dans le modèle ThreeME, de 10 % dans Imaclim-R France mais seulement de 3 % dans le modèle Némésis. Ce dernier accorde davantage de place aux possibilités de substitution entre énergies qu'aux possibilités de réduction de la consommation d'énergie (notamment dans le domaine des transports).

Dans la réalité, les réductions de CO₂ viendront probablement à la fois de l'efficacité énergétique et des substitutions entre énergies. Le critère à court terme pour d'éventuelles politiques de soutien serait alors le coût de la tonne de CO₂ évitée, en prenant en compte les externalités d'apprentissage ou de réseau liées aux perspectives de déploiement des filières concernées. À cet égard, la mise en place d'une fiscalité carbone permet simultanément de favoriser une plus grande efficacité énergétique dans les secteurs consommateurs d'énergie et une réorientation du *mix* énergétique vers les secteurs producteurs d'énergie peu émetteurs de CO₂.

On peut également souligner que le mode de réduction des émissions de CO₂ n'est pas le même à court et à long terme. La hausse du prix du pétrole au milieu des années 2000 a

¹⁹ Le modèle Mésange n'intègre pas de variable sur les émissions de CO₂ et est donc exclu de l'analyse dans cette partie.

²⁰ La trajectoire de la taxe est calculée à partir des émissions du compte central, afin que son produit constitue annuellement 1 % du PIB de ce compte central. Le montant de taxe carbone correspond à une taxe de 66 €2006 /t CO₂ pour Imaclim-R France à l'horizon 2035 ou encore de 79 €2015 /tCO₂ pour Némésis en 2030.

²¹ Dans le modèle ThreeME, la part des énergies renouvelables est fixée pour chaque vecteur : carburant / électricité / gaz & chaleur (cf. annexes).

montré que d'importants gisements d'économies d'énergie existaient, notamment dans l'efficacité énergétique des véhicules, dans l'isolation du bâti et dans un changement des modes de consommation (par exemple par le développement du covoiturage). Cela donne du poids à l'hypothèse d'une réduction des émissions de CO₂ via une plus grande efficacité énergétique qui passe aussi par des évolutions technologiques et organisationnelles. Mais il peut y avoir des limites technologiques à l'efficacité énergétique notamment dans le transport et l'industrie. Si c'est le cas, les réductions ultimes d'émissions de CO₂ pourraient être économiquement plus rentables via des substitutions énergétiques et des modifications de mode production de l'énergie.

Tableau 2
Impacts des chocs simulés sur les indicateurs énergie / climat de la France

	Émissions de CO ₂ *				Consom. énergie finale*				Intensité énergétique*			
	3 ans	5 ans	10 ans	LT**	3 ans	5 ans	10 ans	LT**	3 ans	5 ans	10 ans	LT**
Hausse permanente de 10% des prix des énergies fossiles												
ThreeME WS	-2,0	-2,4	-2,6	-3,3	-1,6	-2,0	-2,1	-2,3	-1,3	-1,6	-1,8	-2,0
ThreeME Ph	-2,0	-2,4	-2,8	-3,1	-1,6	-1,9	-2,1	-2,3	-1,3	-1,6	-1,8	-2,0
Némésis	-1,8	-1,7	-1,8	-1,8	-0,8	-0,7	-0,7	-0,7	-0,8	-0,7	-0,7	-0,4
Imaclim R	-2,1	-2,5	-3,1	-4,2	-1,5	-1,8	-2,4	-2,8	-0,8	-1,2	-2,0	-2,7
Hausse permanente de 100% des prix des énergies fossiles												
ThreeME WS	-12,8	-15,1	-16,0	-17,3	-12,3	-14,7	-15,5	-16,5	-9,9	-12,3	-13,1	-14,6
ThreeME Ph	-12,5	-14,8	-16,0	-17,3	-12,1	-14,5	-15,5	-16,5	-10,0	-12,3	-13,4	-14,6
Némésis	-13,7	-13,0	-13,7	-14,0	-5,9	-5,7	-5,5	-5,2	-5,9	-5,7	-5,5	-2,4
Imaclim R	-10,9	-13,8	-16,2	-23,5	-11,0	-12,2	-14,2	-14,0	-6,3	-8,3	-11,4	-13,7
Hausse permanente de la taxe carbone (équivalente à 1% du PIB en valeur ex ante)												
ThreeME WS	-9,2	-10,2	-11,1	-14,7	-7,2	-8,2	-8,8	-11,5	-6,5	-7,5	-8,2	-10,6
ThreeME Ph	-9,1	-10,1	-11,1	-14,7	-7,2	-8,1	-8,8	-11,6	-6,5	-7,4	-8,0	-10,8
Némésis	-11,6	-10,8	-12,4	-13,7	-3,7	-3,7	-3,9	-4,1	-2,5	-2,5	-2,7	-2,8
Imaclim R	-7,7	-8,9	-10,9	-14,7	-3,3	-3,8	-6,2	-9,9	-1,4	-2,1	-5,1	-9,9
Hausse permanente de la taxe sur l'électricité (équivalente à 1% du PIB en valeur ex ante)												
ThreeME WS	-2,1	-2,9	-3,3	-4,6	-3,9	-4,6	-5,0	-6,2	-3,0	-3,9	-4,3	-5,4
ThreeME Ph	-2,0	-2,8	-3,4	-4,5	-3,8	-4,5	-4,9	-6,5	-3,0	-3,7	-4,2	-5,7
Némésis	-0,5	-0,1	-0,1	-0,2	-3,7	-4,0	-4,3	-4,6	-2,3	-2,5	-2,9	-3,2
Imaclim R	-5,4	-4,2	-4,2	-7,2	-2,4	-3,1	-4,5	-6,3	-1,1	-1,9	-3,5	-6,0

* Écart au compte central, en %.

** À 35 ans pour ThreeME et Imaclim-R ; 15 ans pour Némésis.

Versions de ThreeME : WS = avec équation des salaires Wage-Setting ; Ph = avec courbe de Phillips.

Source : simulation des auteurs.

Conclusion

De nombreux modèles macroéconomiques ont été développés à l'échelle internationale pour évaluer les politiques de réduction des gaz à effet de serre. Ainsi, le chapitre VI *Transformation Pathways* du dernier rapport du Groupe 3 du GIEC (2014) synthétise et analyse les simulations de trente et un modèles prospectifs²². Cette littérature fournit des conclusions dont plusieurs sont proches de celles obtenues avec les modèles français. Le *New Climate Economy Report*²³ souligne notamment que la taxation du carbone doit être accompagnée d'un recyclage des revenus en vue d'améliorer l'efficacité du système fiscal et que les coûts économiques d'une politique bas carbone seront réduits si les marchés du travail sont plus flexibles et en particulier si des politiques efficaces sont menées pour faciliter les transitions professionnelles. Le rapport préconise également que compte tenu des différences importantes entre les *mix* énergétiques nationaux, les politiques soient conduites de manière spécifique à chaque pays. L'évaluation de ces politiques nécessite alors de disposer de modèles qui intègrent correctement les spécificités nationales.

Parmi les modèles applicables à la France, deux autres modèles utilisés par la Commission européenne dans le cadre des évaluations des politiques « énergie climat »²⁴ pourraient être utilisés :

- le modèle GEM-E3²⁵, un modèle d'équilibre général développé dans le cadre d'une collaboration multinationale à laquelle est associée l'équipe SEURECO qui a conçu Némésis ;
- le modèle E3ME²⁶ développé par l'université de Cambridge, modèle hybride fondé sur des simulations économétriques détaillées et couplé à une modélisation fine du système électrique ainsi qu'à un outil d'évaluation des bénéfices environnementaux et sanitaires associés.

Ces deux modèles, ainsi que Némésis peuvent être mobilisés notamment pour mieux prendre en compte les effets liés aux échanges extérieurs et aux politiques mis en œuvre par les partenaires européens de la France.

Aucun modèle ne pourra prendre en compte toutes les dimensions de la transition énergétique. Un regard croisé entre plusieurs exercices de modélisation reste nécessaire pour mieux en appréhender les différents enjeux et construire les politiques de lutte contre le changement climatique les plus efficaces possibles.

²² IPCC Working Group III Contribution to AR5 (2014), *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*, Cambridge University Press.

²³ Le *New Climate Economy Report* émane d'une commission sur l'économie et le climat réunissant des chercheurs au niveau mondial, et a été publié en septembre 2014. <http://newclimateeconomy.report/>

²⁴ Voir par exemple European Commission (2014), "Impact Assessment – A Policy Framework for Climate and Energy in the Period from 2020 up to 2030", SWD (2014) 15 final, Brussels, janvier.

²⁵ Voir le manuel du modèle GEM-E3, « Model Documentation », Joint Research Center, 2013.

²⁶ Voir le manuel du modèle E3ME, « Technical Manual », Version 6.0, April 2014, Cambridge Econometrics.

Annexe 1

L'énergie dans le modèle Mésange

Le modèle Mésange est un modèle conjoint à la direction générale du Trésor et à l'Insee. La version utilisée pour l'exercice de simulation présenté ici est celle estimée en base 2000²⁷, mais une nouvelle version est actuellement en cours de réestimation.

L'économie française y est modélisée sous la forme d'une petite économie ouverte – l'environnement international étant supposé exogène – à trois secteurs d'activité (manufacturier, non manufacturier et non marchand). De taille moyenne (environ cinq cents équations), Mésange se caractérise par une dynamique keynésienne de court terme et un équilibre de long terme déterminé par des facteurs d'offre.

Le module énergie

Le modèle de base n'isole pas formellement la branche énergie, hormis dans le cas des importations. Le module « énergie » distingue les consommations en énergie au sein des consommations en produits non manufacturés des ménages et des entreprises, en y associant des équations de comportement. Les prix hors taxe (hors TVA et hors taxe énergétique) de consommation en énergie des ménages et des entreprises font également l'objet d'une modélisation économétrique. À long terme, les prix de l'énergie s'ajustent sur les prix des importations en énergie, et sur le prix de production total (utilisé comme proxy des prix de production dans l'énergie, qui ne sont pas explicitement modélisés dans Mésange). De la même manière, les équations de consommation et de prix relatives aux produits non manufacturés hors énergie sont estimées. Enfin, les équations d'importations énergétiques et non manufacturières hors énergie sont marginalement modifiées par rapport au modèle de base (prise en compte d'éléments de bouclage relatifs à la demande totale en produits non manufacturés hors énergie).

Le module énergie de Mésange ne distingue pas différents types d'énergie. Un modèle sectoriel dédié est utilisé par la direction générale du Trésor pour modéliser les possibilités de substitutions entre différentes énergies, mais ce modèle n'a pas été utilisé pour les simulations présentées dans ce document de travail, dans la mesure où celui-ci est en cours de réestimation.

La demande en énergie des entreprises

Les consommations intermédiaires (CI) des entreprises en énergie dépendent, à court terme comme à long terme, de la valeur ajoutée et des prix relatifs des CI en énergie (relativement aux prix des CI totales).

Dans le modèle de base, les consommations intermédiaires par produit d'une branche sont calculées à partir de coefficients techniques qui s'appliquent au niveau de production de la branche considérée. Elles ne dépendent donc pas directement des prix et sont considérées

²⁷ Klein C. et Simon O. (2010), «Le modèle Mésange, nouvelle version réestimée en base 2000 », Documents de travail de la DGTPE n°2010/02, mars.

comme complémentaires aux autres facteurs de production. Le module énergie permet au contraire d'introduire un effet « prix » sur le niveau des CI en énergie.

Les élasticités de la consommation en énergie par les entreprises au prix relatif de l'énergie sont calibrées à partir des données fournies par le LEPII²⁸ et fixées à 0,1 à court terme et 0,4 à long terme. Les consommations intermédiaires totales en énergie sont réparties entre les différentes branches utilisatrices au moyen d'une clé de répartition exogène calculée à partir du tableau d'entrées sorties.

Élasticités des consommations intermédiaires en énergie

	Un trimestre	Un an	Deux ans	Cinq ans	Long terme
Valeur ajoutée	0,59	0,66	0,71	0,82	1,00
Prix relatif	-0,10	-0,15	-0,18	-0,27	-0,40

Source : direction générale du Trésor.

La consommation d'énergie des ménages

La consommation des ménages en énergie est modélisée comme une fraction de la consommation totale des ménages qui varie selon l'évolution des prix relatifs de l'énergie, aux prix de la consommation totale des ménages. Par ailleurs, l'ajout d'une tendance permet de prendre en compte la baisse sur le long terme de la part de la consommation d'énergie dans la consommation totale.

L'élasticité de la consommation d'énergie au prix relatif de l'énergie est estimée à 0,39. Les ménages substituent à l'énergie d'autres types de consommation lorsque le coût relatif de l'énergie augmente. Dans les simulations, l'ampleur de cette substitution est toutefois réduite par les effets de bouclage du modèle. Une hausse des prix de l'énergie induit en effet une augmentation des prix de production et de consommation. Ainsi, à l'équilibre, les prix de consommation se rapprochent de ceux de l'énergie, ce qui réduit le prix relatif de l'énergie et donc l'effet de substitution.

Élasticités de la consommation en énergie des ménages

	Un trimestre	Un an	Deux ans	Cinq ans	Long terme
Consommation totale	0,88	0,85	0,93	0,99	1,00
Prix relatifs de l'énergie	0,00	-0,23	-0,32	-0,39	-0,39

²⁸ Laboratoire d'Économie de la Production et de l'Intégration Internationale, CNRS.

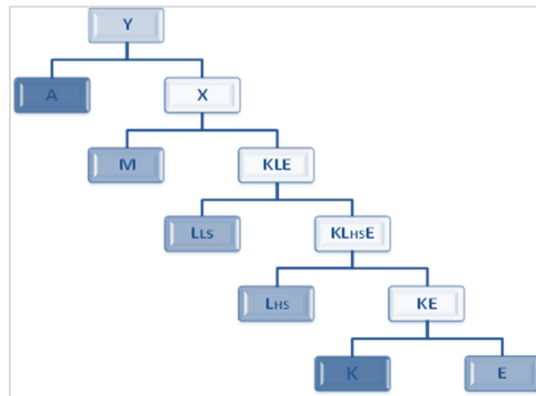
Annexe 2 L'énergie dans le modèle Némésis

Le modèle Némésis se base sur une structure de modèles sectoriels détaillés de trente secteurs pour chaque pays de l'Union européenne. Le cœur économique du modèle est complété par un module « énergie/environnement ». Dans le cadre de l'exercice présenté ci-dessus, seul le modèle français a été utilisé.

La demande d'énergie du secteur productif (hors secteur énergétique)

Le modèle Némésis utilise des fonctions de production de type CES²⁹ emboîtées pour représenter les demandes de facteurs de production ; celles-ci prennent la forme ci-dessous.

Graphique A2.1
Structure CES du modèle Némésis pour les facteurs de production



Source : SEURECO.

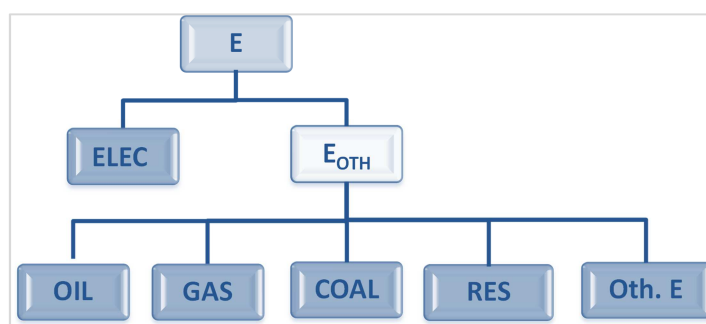
Les élasticités de substitution sont différentes à chaque niveau de la fonction CES et varient également entre secteurs de production. Elles ont été pour l'essentiel estimées et parfois calibrées. Ainsi, l'élasticité de substitution entre les consommations intermédiaires (M) et l'agrégat KLE (Capital-Travail-Énergie) est de 0,05, elle prend des valeurs entre 0,2 et 0,9 pour la substitution entre le travail peu qualifié (L_{LS}) et l'agrégat ($KL_{HS}E$). La substitution entre le travail qualifié (L_{HS}) et l'agrégat KE varie de 0,15 à 0,9 selon les secteurs. L'élasticité de substitution entre le capital (K) et l'énergie (E) varie de 0,05 à 0,85 selon les secteurs.

Le facteur « énergie » est associé au capital au dernier étage de la fonction CES et il est ensuite divisé entre produits énergétiques en deux étapes (graphique A2.2). Un premier niveau de CES distingue l'énergie électrique des autres types de produits énergétiques, avec une élasticité de substitution de 0,7. Au niveau inférieur, dix autres produits énergétiques sont distingués : énergies fossiles (pétrole, gaz et charbon), les énergies renouvelables (biogaz, biocarburants, géothermie, bois et autres biomasses), autres produits énergétiques

²⁹ Constant Elasticity of Substitution.

(déchets urbains et industriels). À ce niveau, l'élasticité de substitution entre produits énergétiques est de 0,4.

Graphique A2.2
Structure CES du modèle Némésis pour les produits énergétiques



Source : SEURECO.

Cette méthodologie, avec des fonctions de production CES emboîtées, est utilisée pour l'ensemble des secteurs de production à l'exception des secteurs énergétiques où sont distinguées les consommations énergétiques de « process » et les autres types de consommation. Les consommations énergétiques dites de « process » sont proportionnelles à la production du secteur (par exemple, la quantité de pétrole brut entrant dans les raffineries est proportionnelle à la quantité de pétrole raffiné sortant des raffineries).

Le secteur énergétique

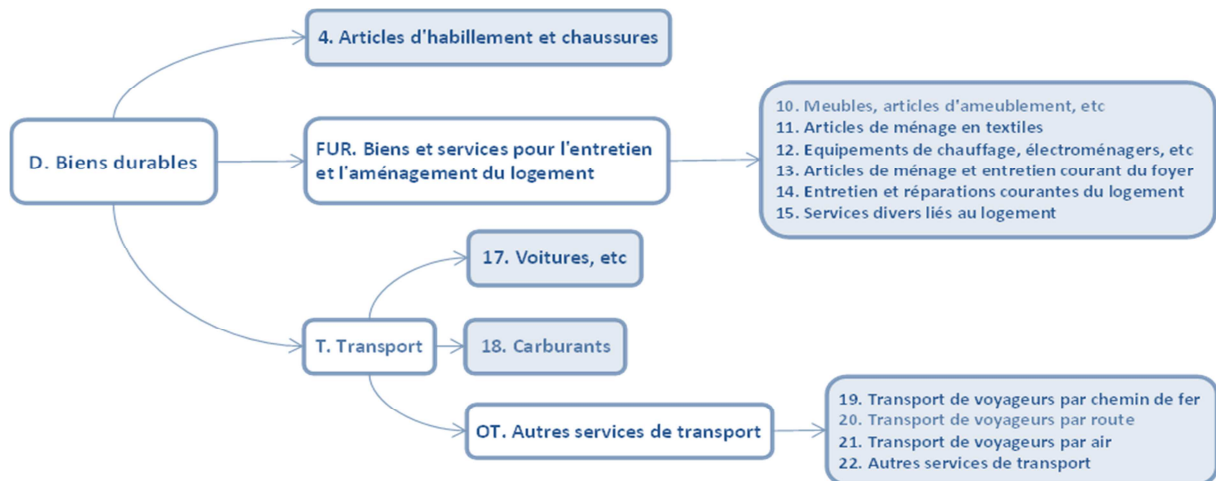
Une modélisation spécifique existe pour le secteur de la production d'électricité. Chaque source d'énergie nécessaire à la production d'électricité est modélisée à l'aide d'une fonction de réaction qui dépend de la demande totale d'électricité, des coûts complets relatifs de chaque technologie (qui intègrent les coûts d'investissement, d'exploitation et de maintenance, des intrants énergétiques et du CO₂) et qui dépend aussi de la part de cette technologie dans le *mix* total ; cette part joue négativement sur le déploiement de la technologie. Par ailleurs, les technologies électronucléaire, hydraulique et géothermique sont ici exogènes.

La consommation d'énergie des ménages

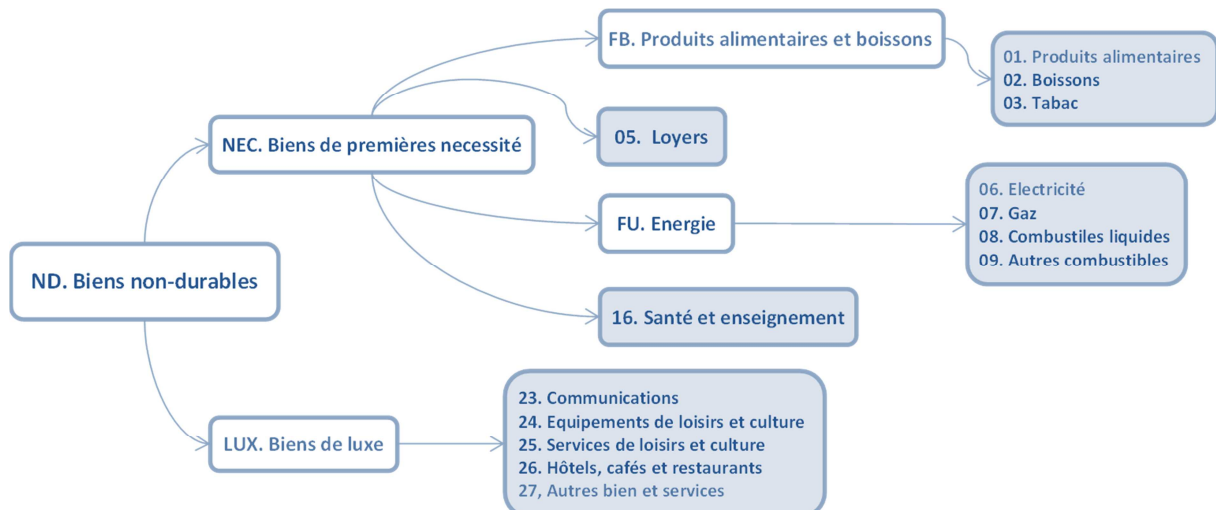
Du côté des consommateurs, les besoins énergétiques des ménages sont intégrés dans les fonctions de consommation des ménages et suivent la même modélisation que ces dernières. Dans une première étape, le modèle détermine le volume global de consommation finale des ménages en fonction des revenus et de la richesse. Dans une seconde étape, la consommation des ménages est divisée en vingt-sept postes de consommation à l'aide d'un module d'allocation, lequel suppose une séparabilité par groupe. Autrement dit, le consommateur représentatif alloue sa consommation agrégée aux vingt-sept postes de consommation par étapes successives. Le consommateur décide d'abord d'allouer sa consommation entre biens durables (graphique A2.3) et biens non durables (graphique A2.4). Puis il alloue la consommation aux sous-groupes associés au type de bien précédemment sélectionné, et ainsi de suite jusqu'à l'allocation aux vingt-sept postes de

consommation. Par exemple, le volume de consommation en biens durables sera alloué vers les consommations d'« Articles d'habillement et chaussures », de « Meubles, articles de ménage et entretien courant du foyer » et de « Transport ». Et pour le sous-groupe « Transport », le consommateur va allouer le volume de consommation de ce sous-groupe aux fonctions de consommation : « Voitures, etc. », « Carburants » et « Autres services de transports ».

Graphique A2.3
Allocation des biens durables



Graphique A2.4
Allocation des biens non durables



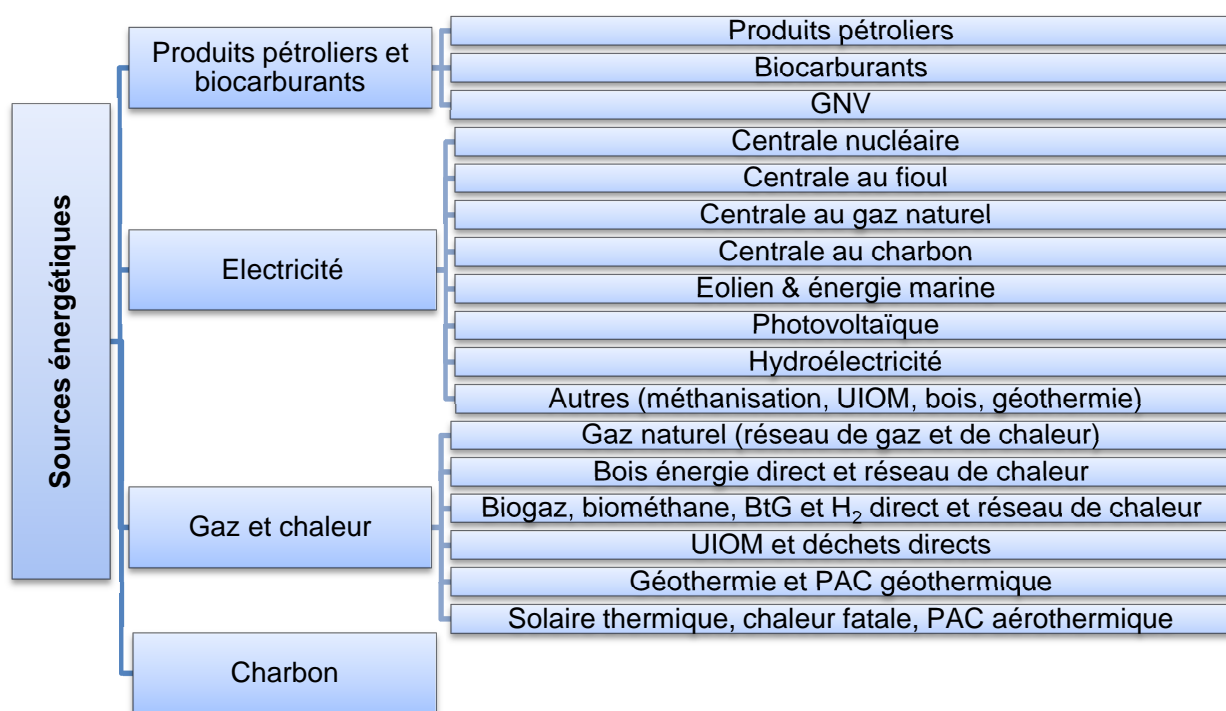
Source : SEURECO.

Annexe 3 L'énergie dans le modèle ThreeME

Le modèle ThreeME comporte dix-sept sous-secteurs énergétiques.

Le poste carburant est décomposé entre fioul et biocarburants ; l'électricité peut être produite soit à l'aide de centrales thermiques (nucléaire, fioul ou gaz) soit à l'aide d'énergies renouvelables (éoliennes et énergies marines, solaire, hydraulique, cogénération et autres). La chaleur et la vapeur sont produites avec du gaz naturel, de la biomasse (solide ou gazeuse), la combustion de déchets et le solaire thermique ou avec la chaleur fatale.

Graphique A3.1
Les sources énergétiques dans ThreeME



Source : ADEME-OFCE.

L'offre énergétique

Les parts des sous-secteurs dans les postes carburant, électricité, chaleur et vapeur sont exogènes. En effet, il appartient à l'État de décider quelle sera la part du nucléaire dans la production d'électricité, par exemple. Ces parts sont fixes dans le scénario tendanciel.

Les coûts de production de chaque sous-secteur sont endogènes. Ils dépendent du coût du travail, du prix des consommations intermédiaires et du coût du capital, des taxes et des subventions à la production. Les prix à la consommation sont égaux aux coûts unitaires de

production, majorés d'une marge plus ou moins flexible selon les variations de la demande en volume, des taxes à la consommation et des accises.

On suppose que l'offre s'ajuste à la demande.

La demande d'énergie des entreprises

Les entreprises réalisent des arbitrages énergétiques :

- elles substituent du capital à l'énergie lorsque le prix relatif de l'énergie augmente ;
- elles peuvent substituer les vecteurs d'énergies les uns aux autres (électricité, carburants ou chaleur) ;
- dans le cadre de cet exercice, le progrès technique est exogène³⁰.

L'élasticité de substitution entre le capital et l'énergie a été fixée à 0,4 dans l'industrie en moyenne. Elle varie d'un secteur à l'autre entre 0,1 et 0,7. Ce chiffre est comparable à celui retenu dans le modèle Emod de l'OFCE³¹. L'élasticité de substitution inter énergies dans l'industrie est supposée égale à 0,4 pour les combustibles servant à la production de chaleur. Elle est fixée à zéro pour les combustibles à double usage, c'est-à-dire ceux utilisés à la fois pour la production de chaleur et en tant que consommation intermédiaire dans la fabrication du produit fini (charbon pour l'acier, pétrole pour la plasturgie, gaz naturel pour la fabrication d'engrais et produits azotés, etc.).

La demande d'énergie des ménages

Les ménages font un choix entre investissements permettant des économies d'énergie (ou non) parmi trois classes de logements et de voitures :

- leurs parts de marché varient en fonction de l'évolution des coûts d'usage (amortissement du prix d'achat net des aides, et consommation d'énergie) ;
- le taux de pénétration des véhicules électriques est supposé exogène.

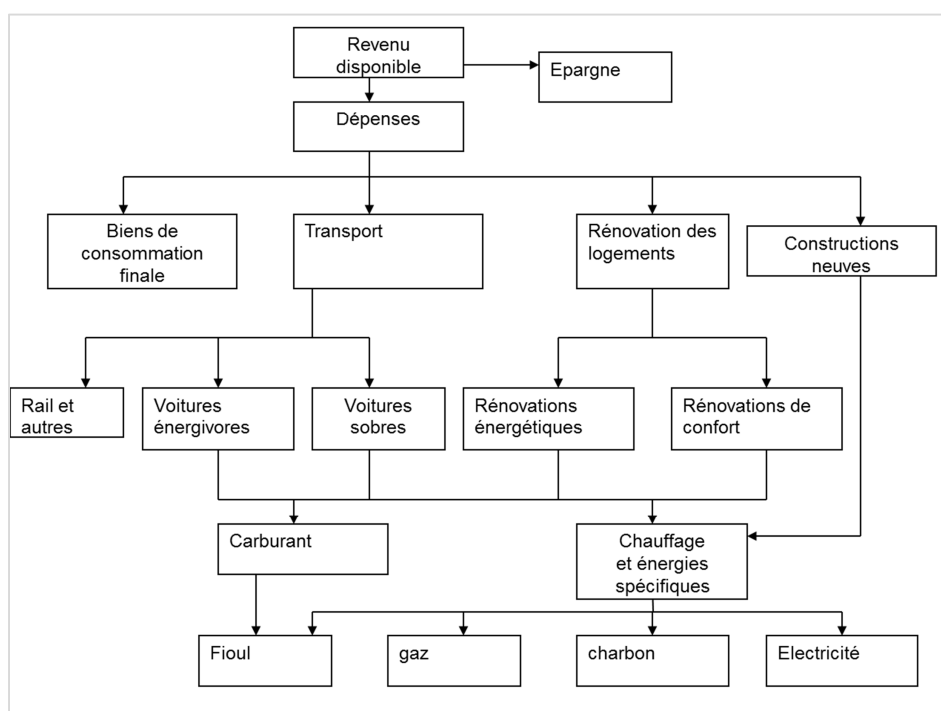
Par ailleurs, ThreeME tient compte de l'effet de sobriété induit par la variation des prix : les ménages réduisent leurs dépenses de chauffage et de carburant lorsque les prix augmentent et inversement.

Le modèle ThreeME a la particularité d'être un modèle hybride : les investissements des agents (les flux) entraînent une modification des parcs de véhicules et immobiliers (les stocks). La nature de ces parcs détermine directement la consommation d'énergie, comme l'indique le schéma ci-dessous.

³⁰ Il est néanmoins possible soit d'endogénéiser les coefficients d'efficacité énergétique dans les secteurs productifs, soit de supposer que l'élasticité de substitution capital-énergie est endogène et croît avec le prix relatif de l'énergie. Voir Kumhof M. et Muir D (2012), "Oil and the World Economy : Some Possible Futures", IMF Working paper, WP/12/56.

³¹ Mosaïque (MOdèle pour la Simulation, l'Analyse et l'Interprétation Quantitative de l'Économie), modèle de l'OFCE devenu e-mod.fr (economic-model.france) en 2002.

Graphique A3.2
Structure globale de ThreeME



Source : ADEME-OFCE.

D'après la littérature économétrique, l'élasticité-prix de la demande de carburant des ménages oscillerait entre -0,3 et -0,8 à court et long terme. Autrement dit, si le prix des carburants croît de 10 %, la demande des ménages chuterait de 3 % à court terme et de 8 % à long terme, grâce à la fois à un regain de sobriété immédiat (réduction de la vitesse et de la mobilité, report de la route vers le rail) et à l'achat de véhicules moins énergivores. Sachant que ces deux phénomènes font l'objet d'une modélisation distincte dans ThreeME, l'élasticité-prix de la demande des ménages à court terme a été prudemment fixée à -0,2 tandis que l'élasticité de substitution entre véhicules neufs a été fixée à 0,8 (lorsque le coût d'usage d'un véhicule énergivore augmente de dix points par rapport à celui d'un véhicule sobre, les ventes de ces derniers augmentent de 8 % au détriment des premiers, au prorata de leurs parts dans les immatriculations neuves.) Là encore ce chiffre peut paraître modeste si l'on songe que l'élasticité de substitution entre les sept classes énergétiques des véhicules a été estimée par l'ADEME à 1,8 lors de l'instauration du bonus-malus automobile.

La sensibilité du taux de croissance des travaux énergétiques réalisés par les ménages au coût d'usage relatif des diverses classes de logements est fixée à 0,6. Le coût d'usage inclut à la fois la facture énergétique et le remboursement des annuités de la dette nécessaire au financement des travaux (hors Crédit d'impôt transition énergétique - CITE).

Annexe 4

L'énergie dans le modèle Imaclim-R France

Imaclim-R France est un modèle de prospective énergie/économie de la famille des modèles Imaclim développés au CIREN. C'est un modèle hybride qui représente l'évolution annuelle simultanée de l'économie et des systèmes techniques sous-jacents à des horizons allant jusqu'au long terme³². Pour dépasser les limites des modèles d'équilibre général intertemporels standard, qui décrivent une trajectoire économique en marchés parfaits assise sur une allocation optimale des investissements, Imaclim-R représente à la fois le moteur de la croissance à long terme (croissance démographique et croissance de la productivité du travail) et les frictions pouvant survenir à court terme (anticipations imparfaites, utilisation incomplète des facteurs de production, inerties à différents niveaux – stocks d'équipements, techniques, préférences, flux commerciaux ou flux de capitaux) au travers d'une architecture récursive. La croissance économique est ainsi décrite comme une succession d'équilibres walrassiens statiques (production, consommation, échanges internationaux) sous un ensemble de contraintes agrégées depuis des modules sectoriels traitant de manière détaillée l'évolution des techniques et des stocks de facteurs de production (capital, travail, ressources naturelles).

Chaque équilibre statique ne décrit pas l'optimum collectif de production compte tenu des techniques disponibles. Au contraire, l'équilibre est contraint à une situation sous-optimale par l'inertie des équipements et l'allocation imparfaite des investissements entre secteurs, entraînant par exemple des surcapacités de production dans certains secteurs et des sous-capacités dans d'autres et créant ainsi des tensions sur les prix et les quantités, l'absence de plein emploi en raison des rigidités du marché du travail, les distorsions créées par les taxes préexistantes ou encore la prise en compte des routines de comportement des agents économiques.

L'économie est désagrégée en treize secteurs : énergie (pétrole brut, pétrole raffiné, gaz, charbon et électricité), transport (transport routier de marchandises, transport par voie d'eau, transport aérien, transport collectif de personnes), construction, industries intensives en énergie, agriculture et autres activités (en particulier services). Le calibrage de ces secteurs repose sur une matrice hybride réconciliant comptabilité nationale et bilans énergétiques, ce qui permet une représentation précise des prix et des quantités d'énergie consommées par les agents économiques et ce qui légitime l'articulation des équilibres walrassiens successifs aux modules technico-économiques. Dans ces modules, des variables physiques explicites (*cf. infra*) ouvrent la voie à l'intégration rigoureuse de données sectorielles relatives à l'impact des incitations économiques sur la demande finale et les systèmes techniques.

La demande d'énergie

Le secteur résidentiel

Le parc est ventilé par vecteur énergétique (électricité, gaz, fioul, bois, charbon), par classe énergétique au sens de l'étiquette énergie pour les bâtiments (classes A à G), et par type de

³² La version utilisée dans ce rapport est calibrée sur l'année 2004 et projette l'économie française jusqu'en 2050.

propriétaires et de logement (cinq catégories : propriétaires occupants ou bailleurs de maisons individuelles, propriétaires occupants ou bailleurs de logements collectifs et logements sociaux). Chaque année, l'effet conjugué de la croissance démographique, de l'augmentation moyenne de la surface par habitant et des démolitions justifie la demande de nouvelles mises en chantier. Les bâtiments construits répondent à l'évolution prévue des réglementations thermiques (bâtiment basse consommation et bâtiment à énergie positive). En outre, l'efficacité thermique des bâtiments existants évolue chaque année par des actions implicites sur l'enveloppe (isolation, double vitrage) et sur les systèmes de chauffage. Ces actions dépendent de la rentabilité relative des options possibles de rénovation (changement d'étiquette de performance ou changement de combustible) spécifiques à chaque type de logement caractérisé par son étiquette énergie et son combustible de départ et l'une des cinq catégories de logement. Le calcul de la valeur actualisée nette (VAN) prend en compte le coût d'investissement incluant les incitations ou aides éventuelles (étiquette de départ-étiquette visée), les économies d'énergie propres à chaque option possible (changement d'étiquette et changement de combustible), actualisées sur leur durée de vie. Des taux d'actualisation spécifiques à chacun des types de propriétaires des logements (propriétaires occupant ou bailleur des logements individuels ou collectifs ou des logements sociaux) permettent de refléter le « dilemme propriétaire-locataire », ainsi que par exemple la difficulté de mettre en œuvre une rénovation des logements dans des copropriétés. La nature imparfaite de l'information se traduit par la prise en compte de « coûts intangibles » qui s'ajoutent aux coûts économiques lorsqu'un propriétaire prend la décision de rénover un logement. Ils décroissent dans le temps du fait de l'accumulation des connaissances, liée à l'accélération de la diffusion de l'information ou à l'« effet de voisinage ».

La consommation d'électricité spécifique des ménages est fonction d'une élasticité-prix (-0,5) et d'une élasticité-revenu supérieure à 1, à l'année de calibrage, mais qui décroît à l'approche d'un plafond de consommation d'électricité spécifique par habitant.

Le transport de passagers

La mobilité des passagers et le partage modal résultent de la maximisation d'une fonction d'utilité tenant compte de la mobilité sous une contrainte de revenu et de budget-temps pour capturer les liens entre demande finale, disponibilité en infrastructures et équipements. Les choix modaux sont le véhicule particulier, les transports collectifs terrestres et aériens, ou les modes doux (marché à pied, vélo...). La construction de nouvelles infrastructures dans un de ces modes de transport permet explicitement de diminuer les phénomènes de congestion et d'augmenter la vitesse de déplacement qui y est attachée et qui est prise en compte dans le budget temps. L'efficacité de la flotte de véhicules particuliers dépend des choix technologiques des ménages lors de l'acquisition des véhicules et du progrès technique. La flotte automobile est détaillée en générations de véhicules, selon leur année de mise en circulation et cinq types de technologies : conventionnels ou hybrides (efficaces ou standard) et véhicules électriques. Les spécifications propres à chacune de ces technologies évoluent dans le temps en fonction du progrès technique. À chaque date, la composition technologique de la nouvelle génération de véhicules résulte d'un choix des agents parmi les technologies explicites, en comparant, pour chaque technologie disponible, le coût moyen actualisé d'un véhicule-kilomètre.

Le transport de marchandises

La demande de fret résulte de l'agrégation de la demande de transport de marchandises de chaque secteur productif. Le volume de transport de fret est directement lié aux modes de

consommation et à la structure de l'économie (économie orientée vers la production de services ou de biens industriels). En revanche, le volume de fret est peu sensible aux prix de l'énergie, les choix modaux étant davantage dictés par les possibilités logistiques et l'organisation de la chaîne d'approvisionnement. De telles options peuvent être représentées de manière exogène en jouant par exemple sur les consommations intermédiaires en transport de la production mais par défaut celles-ci sont considérées constantes.

L'évolution de l'efficacité énergétique des transports maritimes ou aériens est exogène, celle des transports terrestres (routier et ferroviaire) dépend d'une élasticité-prix du carburant de -0,4. L'évolution de la consommation d'énergie (*mix* énergétique et niveau de consommation) du transport terrestre résulte simultanément des mutations technologiques, des reports modaux (notamment celui du fret routier sur le rail guidé par les dotations en infrastructures et les prix relatifs). Les gains d'efficacité énergétique du transport routier sont limités à 30 % entre 2004 et 2050.

Les industries grandes consommatrices d'énergie, le tertiaire et le secteur agricole

L'inertie inhérente aux capacités installées se reflète par le biais d'une représentation en générations de capital (les capacités installées à une certaine date sont d'une technologie donnée et ont une durée de vie incompressible). La consommation d'énergie de chacun de ces secteurs est donc égale à la moyenne pondérée des consommations de toutes les générations de capital installé. L'évolution de la consommation énergétique traduit non seulement l'amélioration des technologies, mais également l'évolution de la répartition des différents sous-secteurs agrégés (à titre d'exemple, réduction de la part des services intensifs en énergie au profit d'autres services). Deux mécanismes sont pris en compte : (i) le progrès technique autonome suivant une tendance historique, et (ii) le progrès technique induit par l'évolution des prix relatifs de l'énergie contenant éventuellement une taxe carbone. Enfin, l'évolution des prix relatifs des énergies induit des substitutions entre vecteurs.

Les vecteurs énergétiques

Le vecteur électrique

Les technologies représentées sont : thermique, gaz, charbon avec ou sans captage et stockage du carbone, fioul, nucléaire existant et de 3^e génération, éolien off- et on-shore, photovoltaïque décentralisé, solaire à concentration, hydroélectricité (incluant les barrages, le fil de l'eau et les stations de transfert d'énergie par pompage). Chacune est caractérisée par des coûts d'investissements, des coûts fixes, des rendements énergétiques, des facteurs d'indisponibilité, des durées de construction et des durées de vie.

La demande d'électricité est l'agrégation des demandes de chacun des secteurs et des ménages. La demande est exprimée sous la forme d'une monotone de charge. Des mesures de gestion de la demande peuvent contribuer à lisser la monotone de charge et limiter le niveau de la pointe. Les technologies de production sont sollicitées pour répondre à cette demande selon leur ordre de mérite en tenant compte des productions fatales (photovoltaïque, éolien et fil de l'eau). L'évolution des capacités installées dépend de la rentabilité des technologies de production en fonction d'anticipations imparfaites qui prolongent les tendances d'évolution de la demande et sur la forme de la monotone de charge.

Une certaine inertie est représentée notamment au travers de la durée de construction des capacités et de leur durée de vie. Des hypothèses exogènes doivent être faites sur la prolongation éventuelle de tout ou partie des centrales nucléaires existantes. Le module électrique fournit ainsi le coût de production de l'électricité et l'investissement en valeur du secteur électrique à l'équilibre walrassien qui détermine quant à lui la demande d'électricité.

Le vecteur gaz

Le contenu carbone du gaz peut diminuer selon le niveau de développement du biogaz en fonction de l'évolution du coût de production du biogaz et des potentiels techniques.

Le vecteur combustible liquide

Les combustibles liquides sont composés de produits pétroliers, de biocarburants et de charbon liquéfié selon les coûts relatifs de production et les potentiels techniques.

RETROUVEZ
LES DERNIÈRES ACTUALITÉS
DE FRANCE STRATÉGIE SUR :



www.strategie.gouv.fr



[francestrategie](https://www.facebook.com/francestrategie)



[@Strategie_Gouv](https://twitter.com/Strategie_Gouv)



FRANCE STRATÉGIE

France Stratégie est un organisme de concertation et de réflexion. Son rôle est de proposer une vision stratégique pour la France, en expertisant les grands choix qui s'offrent au pays. Son action repose sur quatre métiers : évaluer les politiques publiques ; anticiper les mutations à venir dans les domaines économiques, sociétaux ou techniques ; débattre avec tous les acteurs pour enrichir l'analyse ; proposer des recommandations au gouvernement. France Stratégie joue la carte de la transversalité, en animant un réseau de huit organismes aux compétences spécialisées.