



PRÉSENTATION DU MODULE MÉSANGE VERT

Mathieu BOULLOT
Pierre-Louis GIRARD
Nicholas TOKAY

PRÉSENTATION DU MODULE

MÉSANGE VERT

Mathieu Boullot*

Pierre-Louis Girard*

Nicholas Tokay*

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

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

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

pierre-louis.girard@dgtresor.gouv.fr (+33-1-44-87-19-03)

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

Table des matières

Résumé	6
Abstract.....	6
Introduction et présentation générale du module Mésange vert	7
1. Revues de littérature sur la modélisation des blocs climatiques dans les modèles macro-environnementaux et sur les élasticités de substitution entre énergie	9
1.1 Revue de littérature sur la modélisation des modules climatiques dans les modèles macro-environnementaux	9
1.2 Revue de littérature sur les élasticités de substitution entre énergie	9
2. Cadre théorique du module Mésange vert	13
2.1 Calcul du bouquet énergétique.....	14
2.2 Lien avec le modèle Mésange et avec les émissions de CO ₂	16
2.3 Calcul des cales et des volumes chaînés dans le compte central	17
3. Construction du scénario de référence (compte central)	18
3.1 Données de prix par type d'énergie et de bouquet énergétique	18
3.2 Élasticité de substitution	19
3.3 Calcul des cales	20
3.4 Coefficient d'émissions carbone.....	20
4. Cahier de variantes sur la base du scénario AME avec les élasticités de substitution moyennes comme scénario de référence	21
4.1 Variante pétrole	22
4.2 Variante Taxe Carbone	24
4.3 Variante investissement public	26
4.5 Variante Efficience.....	28
4.6 Variante TVA	30
5. Travaux futurs et extensions envisageables	32
Bibliographie	33
Annexe 1 : Tableaux de synthèse des revues de littérature sur les élasticités de substitution dans les modèles macro-environnementaux et leur estimation	35
Annexe 2 : Présentation des différentes spécifications des consommations énergétiques dans le module Mésange vert.....	38
1) CES simple ou généralisée	38
a) Représentation graphique de la fonction de production.....	38
b) Équations des modèles pour le calcul des cales.....	39
c) Impact d'un choc sur les prix de l'énergie	39
2) CES imbriquée à 3 niveaux	41
a) Représentation graphique de la fonction de production.....	41
b) Équations des modèles pour calculer le bouquet.....	41
c) Équations des modèles pour le calcul des cales.....	43
d) Impact d'un choc sur les prix de l'énergie	44
3) CES imbriquée en cascade	46
a) Représentation graphique de la fonction de production.....	46
b) Équations des modèles pour calculer le bouquet.....	47
c) Équations des modèles pour le calcul des cales.....	48
d) Impact d'un choc sur les prix de l'énergie	48

4) Calcul des émissions de carbone.....	49
Annexe 3 : Graphiques relatifs à la construction du compte central.....	50
Annexe 4 : Évolution des émissions de CO ₂ dans le cas de la variante hausse du prix du baril de pétrole de 10\$.....	53
Annexe 5 : Évolution des émissions de CO ₂ dans le cas de la variante hausse de la taxe carbone de 1 pt de PIB <i>ex ante</i>	55
Annexe 6 : Évolution des émissions de CO ₂ dans le cas de la variante hausse de l'investissement public de 1 pt de PIB <i>ex ante</i>	57
Annexe 7 : Évolution des émissions de CO ₂ dans le cas de la variante hausse de l'efficience de 1 %....	59
Annexe 8 : Évolution des émissions de CO ₂ dans le cas de la variante hausse de la TVA de 1 pt de PIB <i>ex ante</i>	61

Résumé

Ce document de travail présente le module Mésange vert, développé pour l'évaluation *ex ante* de l'impact des politiques et des chocs économiques sur les émissions de carbone françaises à horizon 2050. Il se compose d'un bloc énergétique qui permet de déterminer l'évolution du bouquet énergétique, sur la base de la consommation énergétique des ménages et des entreprises, et des prix des énergies. Le module est complété d'un bloc climatique pour calculer les émissions de carbone du territoire national. Le module est complémentaire du modèle macroéconométrique Mésange de sorte à avoir des évaluations macro-environnementales cohérentes. Mésange vert propose une grande flexibilité dans le nombre d'énergies consommées (par défaut quatre, électricité, charbon, pétrole et gaz), dans le nombre d'agents économiques (par défaut ménages et entreprises), dans la spécification de la demande énergétique et dans le calibrage.

Abstract

This working paper provides a description of a new tool, called Mésange vert, to assess the impact of policies and economic shocks on French carbon emissions, up to 2050. Mésange vert consists of an energy block which is used to determine changes in the energy mix. These changes depend on the energy consumption of both households and firms, and energy prices. The tool also includes a climate block to calculate national carbon emissions. The module is complementary to the macroeconomic model Mésange in order to have consistent macro-environmental assessments. Mésange vert offers great flexibility in the number of energies (by default four, electricity, coal, oil and gas), in the number of economic agents (by default households and firms), in the modelling of energy demand and in the calibration of equations.

Introduction et présentation générale du module Mésange vert

La définition des politiques de transition écologique, qui visent entre autres à réduire significativement les émissions de gaz à effet de serre pour contenir les effets délétères du changement climatique, peut s'appuyer sur des outils d'évaluation. L'objectif des évaluations réalisées est d'inférer l'impact des mesures considérées ou mises en place, par rapport aux objectifs qui leur sont assignés, dans une double démarche de coût-efficacité et de comparabilité. De façon plus générale, les outils sur lesquels s'appuient ces évaluations servent à mieux comprendre les effets économiques et climatiques de la transition écologique et du changement climatique.

Ces outils peuvent être classés en deux catégories, selon que l'évaluation porte sur les effets microéconomiques ou macroéconomiques des mesures considérées. La première catégorie d'étude sert à identifier l'impact d'une mesure sur des agents économiques spécifiques (par exemple, les ménages ou les entreprises), par le biais de techniques économétriques, d'une modélisation du comportement de ces agents ou d'études plus qualitatives. Dans le cas de la seconde catégorie d'outils, les évaluations sont réalisées en amont de la mise en place d'une mesure par l'intermédiaire de modèles, c'est-à-dire d'une représentation synthétique des principales interactions économiques nationales entre agents institutionnels (ménages, entreprises et administrations publiques), et avec le reste du monde, en tenant compte des implications énergétiques et/ou climatiques. Ces deux catégories sont ainsi complémentaires, au regard de la nature des outils mobilisables et du moment auquel ces évaluations sont réalisées, c'est-à-dire en amont ou en aval de la mise en place des mesures évaluées.

Ce document de travail présente un module qui s'inscrit dans la deuxième catégorie d'outils d'évaluation. Ce module, nommé Mésange vert, est complémentaire au modèle macroéconométrique Mésange¹ pouvant être mobilisé pour les évaluations *ex ante* de l'impact macroéconomique des réformes et des chocs économiques à moyen-long terme. Ce module permet de déterminer les émissions de CO₂ liées à la consommation finale d'énergie des ménages et des entreprises sur le territoire national², à partir de deux blocs, énergétique et climatique. Le bloc énergétique permet de (i) déterminer l'évolution du bouquet énergétique à partir de séries de prix pour chaque énergie modélisée (ici électricité, charbon, pétrole et gaz), et (ii) convertir en volumes physiques (c'est-à-dire en tonne d'équivalent pétrole) les quantités totales d'énergies consommées calculées par Mésange, exprimées en volume aux prix de l'année précédente chaînés (en euros). Ces calculs sont réalisés sur la base de la sélection préalable du nombre de sources d'énergie – par défaut quatre, électricité, charbon, pétrole et gaz –, d'agents – par défaut deux, ménages et entreprises – et de la structure de la demande en énergie – définie sur la base d'une fonction à élasticité de substitution constante imbriquée. Le bloc climatique permet ensuite de calculer les émissions de carbone à partir des consommations d'énergie par source modélisées *via* des coefficients techniques. Mésange et Mésange vert doivent ainsi être mobilisés de manière séquentielle :

- Mésange est utilisé pour déterminer l'impact d'une réforme sur la consommation d'énergie en volumes chaînés³ en écart à un scénario de référence, avec une distinction possible entre ménages et entreprises ;
- Puis Mésange vert est utilisé pour déterminer l'impact de la réforme sur le bouquet énergétique, la consommation d'énergie en unité physique pour chaque type d'énergie et les émissions de CO₂.

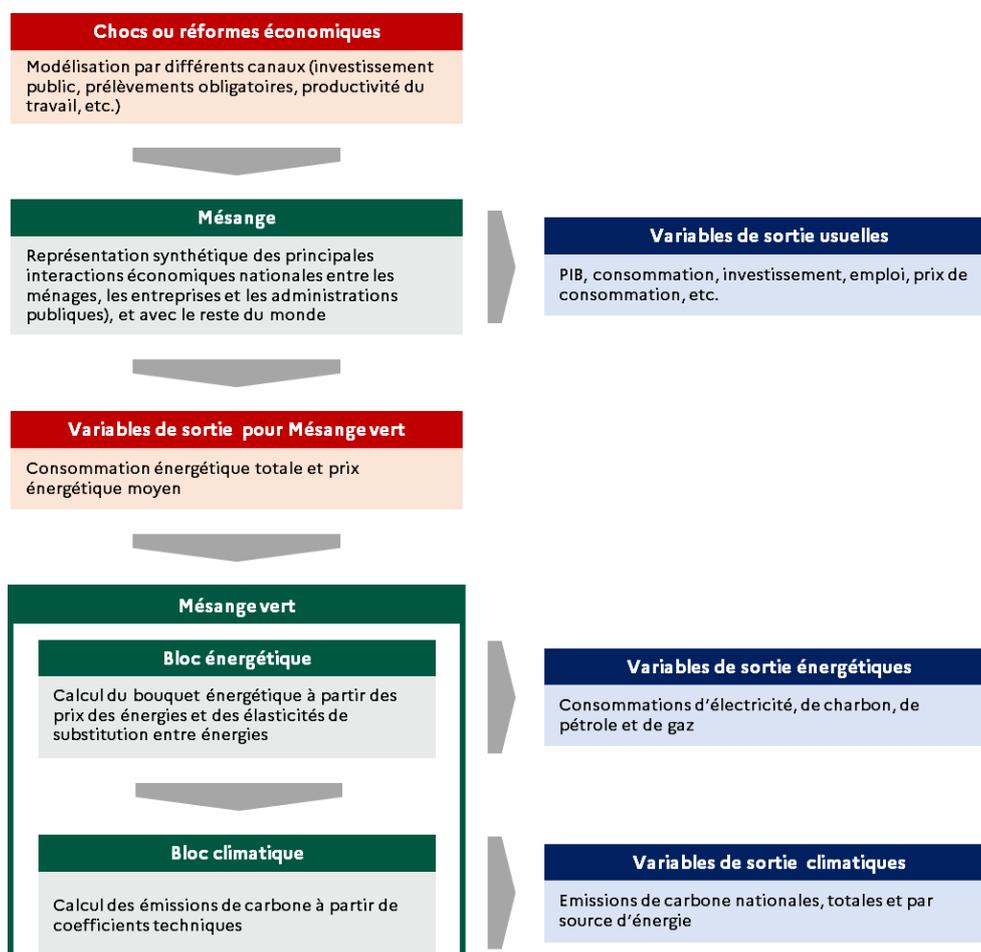
¹ Le modèle macroéconométrique Mésange est développé conjointement par la DG Trésor et l'Insee pour l'évaluation *ex ante* de l'impact macroéconomique des politiques et des chocs économiques. Voir Bardaji J., Campagne B., Khder M. B., Lafféter Q., Simon O. (Insee), Dufernez A. S., Elezaar C., Leblanc P., Masson E. et Partouche H. (2017), « Le modèle macroéconométrique Mésange : réestimation et nouveautés », *Document de travail* n° 2017/04, direction générale du Trésor, Insee.

² Si l'on souhaitait calculer l'empreinte carbone, il faudrait ajouter les émissions domestiques non-liées directement à la consommation d'énergie (e.g. émissions des cheptels), les émissions liées aux importations françaises hors énergie, la consommation d'énergie du secteur énergie, et soustraire les émissions liées aux exportations françaises.

³ Hors secteur énergie car la consommation du secteur énergie n'est pas modélisée.

Le graphique ci-dessous représente l'utilisation de ces deux modèles.

Graphique : Représentation de l'utilisation séquentielle de Mésange et de Mésange vert dans le cadre d'évaluation macroéconomique et climatique



La première partie de ce document propose deux revues de littérature, sur la modélisation des blocs climatiques dans les modèles macro-environnementaux et sur les élasticités de substitution entre énergies, lesquelles conditionnent largement les dynamiques de ces modèles. La deuxième partie décrit le cadre théorique du module Mésange vert. Les données sous-jacentes au module sont détaillées dans la troisième partie. La quatrième partie aborde le comportement variantiel du module, par le biais de différentes variantes analytiques, cohérentes avec le modèle Mésange. La dernière partie liste plusieurs pistes d'amélioration du module.

1. Revues de littérature sur la modélisation des blocs climatiques dans les modèles macro-environnementaux et sur les élasticité de substitution entre énergie

1.1 Revue de littérature sur la modélisation des modules climatiques dans les modèles macro-environnementaux

Les modèles macro-environnementaux de type équilibre général calculable, équilibre général dynamique et stochastique, d'évaluation intégré ou macroéconométrique⁴, utilisent majoritairement une méthodologie comptable et désagrégée, dite « *bottom-up* », pour calculer les émissions de gaz à effet de serre. Cette approche consiste à convertir la consommation énergétique par secteurs et/ou postes de consommation des ménages, exprimée en volume (e.g. tonne équivalent pétrole ou MWh), en émissions, à l'aide de coefficients techniques d'émissions pouvant varier au cours du temps, puis à les agréger. C'est par exemple le cas pour les modèles macroéconométriques E3ME de Cambridge Econometrics et MFMod de la Banque mondiale. Le modèle d'équilibre général calculable ThreeME de l'Ademe et de l'OFCE adopte une approche similaire : les émissions sont indexées sur la consommation énergétique et les coefficients techniques d'émissions peuvent être implicitement calculés comme le ratio des deux variables. Une seconde approche, dite « *top-down* », vise à établir une relation, estimée ou calibrée, entre un agrégat économique (PIB, production, consommation des ménages, etc.) et les émissions de gaz à effet de serre. Les modèles macroéconométriques ACCL de la Banque de France et GEMMES de l'AFD en sont des exemples.

Une grande majorité des modèles ne retient que les émissions générées par les consommations énergétiques. Certains modèles intègrent également d'autres sources d'émissions, telles que le modèle d'équilibre général calculable ENV-linkage de l'OCDE avec les émissions générées par les transports internationaux de marchandises, et le modèle d'évaluation intégré WITCH du RFF-CMCC European Institute on Economics and the Environment avec les émissions provenant des secteurs de l'agriculture ou de l'utilisation des terres et de l'impact de la déforestation.

Enfin, la relation entre les émissions de gaz à effet de serre et l'activité économique peut varier selon le modèle choisi. Les émissions peuvent être des variables de sortie, sans rétroaction sur le reste du modèle (e.g. ThreeME). Le modèle d'équilibre général dynamique et stochastique E-QUEST de la Commission européenne, et de façon générale tout modèle d'évaluation intégré, intègre des fonctions de dommage où l'accumulation de gaz à effet de serre obère l'activité économique, pour modéliser les effets du changement climatique. Ces émissions peuvent être limitées par des coûts d'abattement, qui consistent à réduire l'intensité émettrice des consommations énergétiques contre le paiement d'un montant compensatoire.

1.2 Revue de littérature sur les élasticité de substitution entre énergie

L'élasticité de substitution entre différents types d'énergies est un paramètre central dans les modèles macro-environnementaux, en ce qu'elle conditionne largement le comportement des agents dans l'utilisation des énergies et les conséquences de celle-ci sur les émissions de gaz à effet de serre.

Les modèles macro-environnementaux font généralement l'hypothèse d'une fonction CES pour la consommation d'énergie (des ménages et/ou des entreprises) 1) simple, impliquant une élasticité de substitution entre énergies constante et unique ou 2) imbriquée, avec des élasticité de substitution constantes et différenciées pour chaque niveau modélisé. Dans ces modèles, les élasticité sont calibrées, généralement sur la base de travaux empiriques (voir les Tableaux 2 et 3 *infra*). Ces élasticité sont positives, strictement supérieures à 1, indiquant une substituabilité forte entre les énergies. Cependant, ce choix de calibrage n'est pas toujours fondé empiriquement (e.g. le modèle E-QUEST s'appuie sur l'article théorique d'Acemoglu *et al.*, 2016, dans lequel le choix des élasticité est fait de façon illustrative).

⁴ Voir Gantois *et al.* (2022) pour une présentation détaillée de ces types de modèles.

De nombreux articles fournissent des estimations empiriques des élasticités de substitution entre type d'énergies sur la base de données sur la consommation finale d'énergie. La majorité des articles font la distinction entre les énergies renouvelables et non-renouvelables, ou entre quatre types d'énergie, électricité, pétrole, gaz et charbon. Stern (2009) a réalisé une synthèse des différentes approches pour estimer les élasticités de substitution et des résultats empiriques. La méta-analyse conclut que les résultats dépendent largement des données utilisées, des techniques économétriques mobilisées et de la taille des échantillons. Les résultats fournis par cette méta-analyse en matière d'élasticité de substitution entre types d'énergie (électricité, pétrole, gaz et charbon) sont toutefois à prendre avec précaution étant donné la diversité des travaux sous-jacents, quant aux techniques et aux données utilisées.

En matière de spécifications, la plupart des articles utilisent une approche qui estime une fonction de coût ayant une forme « *trans-log* », qui consiste en un développement à l'ordre deux de la fonction de coût en chacun de ses termes. Cette spécification est utilisée en raison de sa flexibilité, qui ne suppose aucune relation *a priori* entre les facteurs de production et qui permet d'inclure un nombre illimité de facteurs conditionnellement à la taille de l'échantillon. Cependant, cette grande flexibilité peut présenter des inconvénients, tels qu'une élasticité prix de la demande d'un facteur positive ou des parts dans le coût total de certains facteurs négatives, incohérents avec les définitions théoriques sous-jacentes. Jones (1995) et Steinbuck (2012) utilisent un modèle logit linéaire⁵, qui donnerait des résultats plus robustes qu'un modèle « *trans-log* ». Le choix entre ces deux modèles repose sur un arbitrage entre flexibilité du modèle choisi et estimation du modèle. Le modèle logit linéaire suppose une forme sur la relation des facteurs de production, de sorte que toute l'information résidant dans les données est utilisée dans l'estimation des élasticités. Cet arbitrage en faveur de l'estimation des élasticités de substitution aux dépens d'une flexibilité sur les relations entre les facteurs de production est mis en avant par les auteurs. D'autres spécifications s'appuient sur une fonction CES, notamment lorsque la substitution entre deux énergies est étudiée (Jo et Ara, 2020 et Papageorgiou *et al.*, 2017). Enfin, une méthode non-paramétrique permet de ne pas faire d'hypothèse sur la forme de la fonction sous-jacente et par conséquent une plus grande flexibilité dans l'estimation (Malikov *et al.*, 2018).

Compte tenu du risque de variables omises, les méthodes d'estimation économétrique les plus fréquemment utilisées dans cette littérature sont la « SUR » (seemingly unrelated regression) et l'« iSUR » (iterative seemingly unrelated regressions), lesquelles permettent de tenir compte du fait que les erreurs peuvent être colinéaires entre elles (Shahiduzzaman et Alam, 2013, Hyland et Haller, 2015 et Ma et Stern 2016). Une technique alternative utilisée pour prendre en compte le problème de variables omises est la « Ridge regression » (Smyth, *et al.*, 2010 et de Raza et Tang, 2022). Cette méthode est utilisée lorsque les variables dépendantes sont hautement corrélées, pour accroître l'efficacité de l'estimateur contre une augmentation tolérable de biais de l'estimateur⁶.

Les élasticités de substitution sont finalement calculées sur la base des paramètres estimés et des données sous-jacentes. Cinq définitions d'une élasticité de substitution peuvent être distinguées. Lorsque le nombre d'énergies est égal à deux, l'élasticité est définie au sens de Hicks. Lorsque le nombre d'énergies est strictement supérieur à deux, quatre définitions peuvent être mobilisées, i) à la Allen-Uzawa, ii) à la Morishima, iii) « cross-price elasticity » et iv) « shadow elasticity ». L'encadré 1 détaille ces cinq définitions.

⁵ Il s'agit d'un modèle de régression économétrique dans lequel la probabilité d'observer certaines valeurs d'une variable d'intérêt dépend de variables explicatives.

⁶ L'efficacité d'un estimateur fait référence à l'écart type associé à l'estimation du paramètre estimé. Lorsque l'écart-type est faible, l'estimation est par conséquent précise et l'estimateur est considéré efficace. Le biais d'une estimation fait référence à l'écart systématique entre l'estimation d'un paramètre et sa valeur théorique.

Encadré 1 : Présentation des différentes mesures d'élasticité de substitution

De façon générale, l'élasticité de substitution au niveau des ménages (resp. des entreprises) mesure la variation du ratio de la consommation de deux biens finaux (resp. de deux intrants de production) due à la variation de leur utilité marginale (resp. de leur productivité marginale). À l'équilibre, l'utilité (resp. la productivité) marginale est égale au prix du bien (resp. de l'intrant). Ainsi, l'élasticité mesure la variation dans l'utilisation de deux biens ou intrants provoquée par un changement de leur prix relatif. En pratique, plusieurs types d'élasticité de substitution peuvent être distinguées. Leur classification repose principalement sur trois dimensions, i) en fonction du type de programme initial à partir duquel les élasticités ont été calculées (maximisation d'une fonction de consommation ou de production ou minimisation d'une fonction de coût associé), ii) si ce sont des élasticités brutes ou nettes, c'est-à-dire si l'on prend respectivement en compte ou non les potentielles variations de la production/utilité générées par la variation de prix, et enfin iii) si ces élasticités sont symétriques ou non⁷.

La mesure usuelle de l'élasticité de substitution est l'élasticité « directe » ou élasticité de substitution Hicksienne (HES) définie par :

$$HES_{ij} = \frac{\partial \ln \left(\frac{x_i}{x_j} \right)}{\partial \ln \left(\frac{p_i}{p_j} \right)} \Bigg|_y$$

Cette mesure évalue la variation des biens ou d'intrants x_i et x_j lorsque le rapport de leur prix $\frac{p_i}{p_j}$ est modifié, en supposant le revenu/la production y inchangée.

Cette définition peut être utilisée lorsque le nombre de biens ou d'intrants est limité à deux. Lorsque ce nombre est strictement supérieur à deux, l'élasticité au sens de Hicks trouve une limite en ce qu'elle ne permet pas de prendre en compte les effets indirects de la variation du prix relatif $\frac{p_i}{p_j}$ sur l'utilisation de biens ou intrants autres x_k avec $k \neq \{i, j\}$ qui influerait également sur la variation des deux biens ou intrants considérés $\frac{x_i}{x_j}$. D'autres définitions ont ainsi été proposées dans ce cadre général.

L'élasticité de substitution d'Allen-Uzawa (AES), ou élasticité de substitution « partielle », est une généralisation de l'élasticité de Hicks. Elle mesure la variation de l'utilisation d'un premier bien par rapport à la variation du prix d'un second bien de production, corrigée de la part du second facteur dans le coût total. Elle est définie par :

$$AES_{ij} = \frac{\partial \ln(x_i)}{\partial \ln(p_j) S_j}$$

Où S_j désigne la part du bien dans la consommation totale (resp. la part de l'intrant dans les coûts de production totaux).

Une deuxième mesure est l'élasticité croisée des prix (CPE, pour « cross price elasticity »), qui mesure l'effet d'une variation d'un prix d'un bien sur l'utilisation d'un autre bien. Elle est définie par :

$$CPE_{ij} = \frac{\partial \ln(x_i)}{\partial \ln(p_j)}$$

Par ailleurs, lorsque $i = j$, on parle d'élasticité prix propre (OPE, pour « own price elasticity »). Comme définies par Stern (2012), les élasticités CPE et AES sont des élasticités dites « scalaires » : leurs signes donnent une information sur la complémentarité et la substituabilité des biens, mais la valeur de l'élasticité ne dit rien quant au degré de complémentarité ou de substituabilité entre biens ou intrants.

Une troisième mesure est l'élasticité de substitution de Morishima. Il s'agit d'une élasticité dite « de ratios » : elle est positive et sa valeur informe sur le degré de substituabilité ou de complémentarité entre les biens ou intrants. Si l'élasticité est comprise entre 0 et 1, les énergies sont complémentaires, et une

élasticité plus grande que 1 indique une substituabilité entre ces énergies. L'élasticité de Morishima est calculée comme la différence entre la variation dans l'utilisation du bien i provoquée par la variation du prix du bien j et la variation du bien i due à la variation de son propre prix.

Formellement, on a :

$$MES_{ij} = \frac{\partial \ln(x_i)}{\partial \ln(p_j)} - \frac{\partial \ln(x_i)}{\partial \ln(p_i)} = CPE_{ij} - CPE_{ii}$$

Cette mesure est une différence entre une CPE et une OPE. À noter que la CPE et la MES sont asymétriques *a contrario* de l'AES.

Finalement, une dernière mesure est l'élasticité de substitution « shadow » (SES). Cette mesure est définie comme une moyenne des élasticités de Morishima entre i et j pondérées par les poids des biens dans les dépenses (ou les coûts de production) :

$$SES_{ij} = \frac{S_i}{S_i + S_j} (MES_{ij} + MES_{ji})$$

Cette élasticité agrège les propriétés des mesures HES et MES. La SES est symétrique contrairement à la MES et sa valeur offre une mesure résumant le degré de substituabilité ou de complémentarité entre les biens ou intrants. La SES est la définition retenue par Stern dans sa méta-analyse (Stern, 2009), utilisée pour calibrer les élasticités de substitution entre les énergies fossiles dans le module Mésange vert.

⁷ Une élasticité est symétrique si l'élasticité entre le facteur « i » et « j » est égale à celle entre « j » et « i », tandis qu'une élasticité est dite asymétrique lorsqu'elle varie avec le prix choisi pour calculer l'élasticité, ce qui accorde une importance à la variation du prix de chaque facteur de production.

2. Cadre théorique du module Mésange vert

Le module Mésange vert vise à évaluer l'impact des réformes et de chocs économiques sur les émissions de carbone de la France à moyen-long terme, en complément de l'évaluation *ex ante* de leur impact macroéconomique à l'aide du modèle Mésange (voir l'Encadré 2 ci-dessous pour une présentation générale du modèle). Le module Mésange vert se compose de deux blocs, un bloc énergétique construit sur la consommation finale énergétique du territoire pour définir l'évolution du bouquet énergétique et faire le lien avec le modèle Mésange, et un bloc climatique pour calculer les émissions de carbone. Le bloc énergétique permet de (i) déterminer l'évolution du bouquet énergétique à partir de séries de prix pour chaque énergie modélisée, et (ii) convertir en volumes physiques (c'est-à-dire en tonne d'équivalent pétrole) les quantités totales d'énergies consommées calculées par le modèle Mésange, exprimées en volume aux prix de l'année précédente chaînés (en euros). Ces calculs sont réalisés sur la base de la sélection préalable du nombre de sources d'énergie, d'agents et de la structure de la demande en énergie. Le bloc climatique permet ensuite de calculer les émissions de carbone à partir des consommations d'énergie par source modélisées *via* des coefficients techniques. En l'absence de montée en charge progressive des chocs (qui procéderait de rigidités dans l'adaptation des comportements des ménages et des entreprises), le module est davantage approprié pour analyser les ajustements du bouquet énergétique et des émissions de carbone à moyen-long terme, plutôt qu'à court terme.

Par défaut, quatre types d'énergies (électricité E_t , charbon C_t , pétrole P_t et gaz G_t) sont considérés. Ils sont agrégés à l'aide d'une CES imbriquée (notée CESI par la suite) à deux niveaux, où l'électricité est d'abord combinée avec un agrégat énergie fossile CPG_t (charbon, pétrole et gaz), puis les trois énergies restantes, charbon pétrole et gaz, sont combinées simultanément.

L'approche CESI a été préférée à une approche CES généralisée (CESG, cf. Annexe 2) car plus ancrée dans la théorie économique. En pratique, les deux modèles sont proches, la différence portant principalement sur les élasticités calibrées vs endogènes (e.g. la CESI permet, par exemple, de calibrer les élasticités de substitution par rapport à une énergie donnée, alors que la CESG permet de calibrer les élasticités au sein d'un sous-agrégat et entre agrégats). La littérature sur les élasticités de substitution étant peu robuste⁸ (voir *supra*), les modèles CESI et CESG apparaissent tout aussi difficiles à calibrer et le modèle CESI a été préféré car les hypothèses structurelles permettant de dériver les fonctions de demande sont plus transparentes – bien que les hypothèses portant sur les élasticités soient plus faciles à interpréter à l'aide d'une CESG.

Encadré 2 : Présentation générale du modèle macroéconométrique Mésange

Mésange (Modèle Économétrique de Simulation et d'ANalyse Générale de l'Économie) est un modèle macroéconométrique trimestriel de l'économie française développé et utilisé conjointement par l'Insee et la direction générale du Trésor. Il repose sur une petite économie ouverte dans laquelle les agents économiques (ménages, entreprises et administrations publiques) sont modélisés dans leurs comportements de consommation, d'investissement, de détermination des prix et des salaires, l'environnement international étant supposé exogène. Mésange se caractérise par une approche keynésienne où les comportements de demande prédominent à court terme tandis que l'offre conditionne le long terme.

Le modèle est constitué de trois types d'équations : des équations de comportement, ou structurelles, sont estimées économétriquement et traduisent des comportements économiques (par exemple, à long

⁸ À cause de problèmes liés aux données (e.g. périodes ou pays particuliers) mais aussi à la méthodologie (e.g. selon les modèles théoriques, certaines élasticités sont endogènes, ce que néglige tout à fait les études empiriques).

terme, la consommation des ménages dépend de leur revenu, avec un taux d'épargne stable) ; les identités comptables garantissent la cohérence entre les principaux agrégats de la comptabilité nationale (par exemple, l'équilibre emplois-ressources) ; des relations techniques permettant de relier certaines variables entre elles à l'aide de coefficients calibrés hors modèles (les consommations intermédiaires hors énergétiques sont supposées comme une part constante de la production). Deux types de travailleurs (qualifiés et non-qualifiés) et cinq secteurs d'activité sont par ailleurs modélisés (agriculture et industries manufacturières, services exposés à la concurrence internationale, services abrités, énergie et services non-marchands).

Mésange est utilisé pour évaluer *ex ante* l'impact macroéconomique de politiques et de chocs économiques, sur la base d'une combinaison linéaire de variables exogènes choquées (par exemple, l'investissement public, la TVA ou le prix du baril de pétrole). En particulier, le modèle a été mobilisé pour évaluer le Plan de relance mis en place à la suite de la crise COVID⁹.

2.1 Calcul du bouquet énergétique

Au niveau 1, la consommation totale d'énergie Q_t est définie par :

$$Q_t = \left(a_{E,t} E_t^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} + a_{CPG,t} CPG_t^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} \right)^{\frac{\sigma}{\sigma-1}}$$

Au niveau 2, l'agrégat d'énergies fossiles CPG_t est lui-même défini par :

$$CPG_t = \left(a_{C,t} C_t^{\frac{\delta-1}{\delta}} + a_{P,t} P_t^{\frac{\delta-1}{\delta}} + a_{G,t} G_t^{\frac{\delta-1}{\delta}} \right)^{\frac{\delta}{\delta-1}}$$

Les indices de prix sont tels que :

$$P_{Q,t} Q_t = P_{E,t} E_t + P_{CPG,t} CPG_t$$

$$P_{CPG,t} CPG_t = P_{P,t} P_t + P_{G,t} G_t + P_{C,t} C_t$$

On peut donc déterminer les fonctions de demande et prix agrégés à chaque niveau :

- Niveau 1 :

$$E_t = a_{E,t}^{\sigma} \left(\frac{P_{E,t}}{P_{Q,t}} \right)^{-\sigma} Q_t, \quad CPG_t = a_{CPG,t}^{\sigma} \left(\frac{P_{CPG,t}}{P_{Q,t}} \right)^{-\sigma} Q_t$$

$$P_{Q,t} = \left(a_{E,t}^{\sigma} P_{E,t}^{1-\sigma} + a_{CPG,t}^{\sigma} P_{CPG,t}^{1-\sigma} \right)^{\frac{1}{1-\sigma}}$$

- Niveau 2 :

$$j_t = a_{j,t}^{\delta} \left(\frac{P_{j,t}}{P_{CPG,t}} \right)^{-\delta} CPG_t, \quad j \in \{C, P, G\}$$

$$P_{CPG,t} = \left(a_{C,t}^{\delta} P_{C,t}^{1-\delta} + a_{P,t}^{\delta} P_{P,t}^{1-\delta} + a_{G,t}^{\delta} P_{G,t}^{1-\delta} \right)^{\frac{1}{1-\delta}} \quad (1)$$

⁹ Voir l'encadré 9 du Rapport économique, social et financier de 2021.

Remarque : les variables Q_t, CPG_t ne sont pas observées directement car correspondant à des quantités agrégées à l'aide d'un agrégateur CES.

En prenant l'électricité comme référence, les équations ci-dessus peuvent s'écrire :

$$\frac{\Omega_{j,t}}{\Omega_{E,t}} = \alpha_{j,t}^{\delta} \left(\frac{P_{j,t}}{P_{CPG,t}} \right)^{-\delta} \left(\frac{a_{CPG,t}}{a_{E,t}} \right)^{\sigma} \left(\frac{P_{CPG,t}}{P_{E,t}} \right)^{-\sigma}, \quad j \in \{C, P, G\} \quad (2,3,4)$$

Où $\Omega_{j,t} \equiv \frac{j_t}{E_t + P_t + C_t + G_t}$ est la part de l'énergie j dans le bouquet énergétique.

Et le système est bouclé en agréant les différentes énergies :

$$\Omega_{E,t} + \Omega_{C,t} + \Omega_{P,t} + \Omega_{G,t} = 1 \quad (5)$$

Les équations 1-5 permettent de déterminer le bouquet énergétique à partir de séries de prix pour les différentes énergies.

Encadré 3 : Calcul de l'évolution du bouquet énergétique et des élasticités de substitution

On peut log-linéariser les équations de Mésange vert – en supposant ici les cales constantes (sans perte de généralité).

$$d \log P_{CPG,t} = \varphi_C d \log P_{C,t} + \varphi_P d \log P_{P,t} + \varphi_G d \log P_{G,t}$$

$$\Omega_C d \log \Omega_{C,t} + \Omega_E d \log \Omega_{E,t} + \Omega_P d \log \Omega_{P,t} + \Omega_G d \log \Omega_{G,t} = 0$$

$$d \log \Omega_{j,t} - d \log \Omega_{E,t} = -\delta d \log P_{j,t} + \sigma d \log P_{E,t} + (\delta - \sigma) d \log P_{CPG,t}, \quad j \in \{C, P, G\}$$

Où $\varphi_{j,t} \equiv \frac{P_{j,t} j_t}{P_{CPG,t} CPG_t}$ dénote la part de l'énergie fossile j (en valeur) au sein des énergies fossiles.

On peut calculer les parts en fonction des prix :

$$d \log \Omega_{E,t} = -\sigma(1 - \Omega_E) d \log P_{E,t} + \delta(\Omega_C d \log P_C + \Omega_G d \log P_{G,t} + \Omega_P d \log P_{P,t}) - (\delta - \sigma)(1 - \Omega_E) d \log P_{CPG,t}$$

$$d \log \Omega_{j,t} = d \log \Omega_{E,t} - \delta d \log P_{j,t} + \sigma d \log P_{E,t} + (\delta - \sigma) d \log P_{CPG,t}, \quad j \in \{C, P, G\}$$

L'élasticité-prix associée à l'énergie i est définie comme la variation de sa part dans le bouquet énergétique rapportée à la variation de son prix :

$$\gamma_{i,t} \equiv \frac{d \log \Omega_{i,t}}{d \log P_{i,t}} \Big|_{\forall k \neq \{i\}, p_{k,t} \text{ constants}}$$

Remarque : l'élasticité-prix de la part dans le bouquet énergétique ne coïncide pas avec l'élasticité-prix de la demande d'énergie, $\frac{d \log J_{i,t}}{d \log P_{i,t}} \Big|_{\forall k \neq \{i\}, p_{k,t} \text{ constants}}$ où $d \log J_{i,t}$ dénote la demande d'énergie $J \in \{E, C, P, G\}$, en unité physique.

Ces élasticités sont donc ici données par :

$$\gamma_{E,t} = -\sigma(1 - \Omega_E)$$

$$\gamma_{j,t} = -\delta(1 - \Omega_j) + (\delta - \sigma)\Omega_E \varphi_j, \quad j \in \{C, P, G\}$$

Notons que l'élasticité-prix de la part dans le bouquet est négative ou nulle pour toutes les énergies simultanément si $\sigma, \delta \geq 0$ et $\sigma > \delta$.

L'élasticité-prix croisée qui désigne la variation de la part de l'énergie i dans le bouquet énergétique due à la variation du prix de l'énergie $j \neq i$ est définie comme :

$$\gamma_{ij,t} \equiv \frac{d \log \Omega_{i,t}}{d \log P_{j,t}} \Big|_{\forall k \neq \{j\}, p_{k,t} \text{ constants}}$$

Ces élasticités sont donc ici données par :

$$\gamma_{Ej,t} = \delta \Omega_j - (\delta - \sigma)(1 - \Omega_E) \varphi_j, \quad j \in \{C, P, G\}$$

$$\gamma_{ij,t} = \delta \Omega_j + (\delta - \sigma) \Omega_E \varphi_j, \quad i, j \in \{C, P, G\}, i \neq j$$

$$\gamma_{jE,t} = \sigma \Omega_E, \quad j \in \{C, P, G\}$$

L'élasticité de substitution (au sens de Hicks) entre deux énergies i et $j \neq i$ peut se calculer à l'aide de la formule suivante :

$$\sigma_{ij,t} \equiv - \frac{d \log \Omega_{j,t} - d \log \Omega_{i,t}}{d \log P_{j,t} - d \log P_{i,t}} \Big|_{\forall k \neq \{i,j\}, p_{k,t} \text{ constants}}$$

Ces élasticités sont donc ici données par :

$$\sigma_{CP,t} = \sigma_{CG,t} = \sigma_{GP,t} = \delta$$

$$\sigma_{jE,t} = \sigma + (\delta - \sigma)(1 - \varphi_{j,t}) \frac{1}{1 - \frac{d \log P_{E,t}}{d \log P_{j,t}}}, \quad j \in \{C, P, G\}$$

Remarque : seules les élasticités de substitution entre l'énergie décarbonée et les énergies fossiles d'une part, et entre les énergies fossiles d'autre part sont exogènes et calibrées, les autres étant endogènes.

2.2 Lien avec le modèle Mésange et avec les émissions de CO₂

Après avoir simulé les chocs correspondant à la réforme à modéliser dans Mésange, on peut déterminer l'évolution des quantités d'énergie en volumes chaînés $I_{t,h}^c$ à partir du compte central et des sorties exprimées en pourcentage en écart au compte central :

$$I_{t,h}^c = \left(1 + \frac{\hat{I}_{t,h}^c}{100} \right) I_{cc,t,h}^c$$

Où $I_{cc,t,h}^c$ sont les volumes chaînés du compte central (calibrés) et $\hat{I}_{t,h}^c$ est déterminé par Mésange. La définition générale des volumes chaînés est donnée par :

$$I_{t,h}^c = \underbrace{\sum_i P_{i,h} I_{i,h} \times \frac{\sum_i P_{i,h} I_{i,h+1}}{\sum_i P_{i,h} I_{i,h}} \times \dots \times \frac{\sum_i P_{i,t-2} I_{i,t-1}}{\sum_i P_{i,t-2} I_{i,t-2}} \times \frac{\sum_i P_{i,t-1} I_{i,t}}{\sum_i P_{i,t-1} I_{i,t-1}}}_{I_{t-1,h}^c}$$

Pour déterminer les émissions de CO₂, ces volumes chaînés doivent être convertis en unités physiques.

On peut lier les volumes chaînés et les volumes physiques *via* la formule suivante¹⁰ – avec $h=2010$ comme période de référence dans Mésange :

$$I_{t,h}^c = \begin{cases} P_h I_h, & \text{si } t = h \\ I_{t-1,h}^c \frac{\bar{P}_{t-1} I_t}{P_{t-1} I_{t-1}} & \text{si } t > h \end{cases}$$

Ou encore, pour tout $t > h$,

$$I_t = \frac{I_{t,h}^c}{I_{t-1,h}^c} \frac{P_{t-1}}{\bar{P}_{t-1}} I_{t-1} \quad (6)$$

Où, dans le cas présent, P_t est le prix de l'énergie en unité physique :

$$P_t = P_{E,t} \Omega_{E,t} + P_{C,t} \Omega_{C,t} + P_{G,t} \Omega_{G,t} + P_{P,t} \Omega_{P,t} \quad (7)$$

\bar{P}_{t-1} est le prix de l'énergie à partir des prix des différents types d'énergie de l'année précédente :

$$\bar{P}_{t-1} \equiv P_{E,t-1} \Omega_{E,t} + P_{C,t-1} \Omega_{C,t} + P_{G,t-1} \Omega_{G,t} + P_{P,t-1} \Omega_{P,t} \quad (8)$$

Et I_t représente les volumes physiques¹¹ :

$$I_t \equiv E_t + C_t + G_t + P_t$$

On peut ensuite calculer les émissions de CO2 :

$$CO2_t = (\gamma_{E,t} \Omega_{E,t} + \gamma_{C,t} \Omega_{C,t} + \gamma_{G,t} \Omega_{G,t} + \gamma_{P,t} \Omega_{P,t}) I_t \quad (9)$$

Étant données les sorties de Mésange et des équations 1-5, les équations 6-9 permettent de déterminer les volumes physiques et les émissions de CO₂.

2.3 Calcul des cales et des volumes chaînés dans le compte central

Avant de simuler l'impact d'un choc sur le bouquet énergétique, il est nécessaire de caler le compte central du module Mésange vert, c'est-à-dire de déterminer les paramètres $\{a_{i,t}\}$ ainsi que les volumes chaînés cohérents avec les séries physiques du compte central.

Pour estimer les cales, on peut utiliser les équations 1-4 en rendant le bouquet exogène et les cales endogènes, et boucler en normalisant les cales :

$$a_{E,t} + a_{CPG,t} = 1 \quad (10)$$

$$a_{C,t} + a_{P,t} + a_{G,t} = 1 \quad (12)$$

Pour déterminer les volumes chaînés du compte central, on peut utiliser les équations 6-8 en rendant les volumes chaînés endogènes et les volumes physiques exogènes.

¹⁰ Voir Eyraud (2007).

¹¹ I_t diffère de Q_t , développé dans la partie précédente, qui correspond à la quantité d'énergie agrégée à l'aide d'une fonction CES – la variable Q_t n'est donc pas directement observée, ni utile pour le calcul du bilan carbone.

3. Construction du scénario de référence (compte central)

La construction du compte central suppose de sélectionner au préalable un nombre de types d'énergie (par défaut quatre, charbon, pétrole, gaz et électricité) et d'agents (par défaut deux, ménages et entreprises). Les données de prix et de consommation finale en énergie, pour chaque type et agent, sont ensuite sélectionnées parmi deux scénarios, modélisant respectivement les mesures de décarbonation prises jusqu'à une date donnée ou une trajectoire de décarbonation compatible avec les objectifs de neutralité carbone en 2050. Le jeu d'élasticités de substitution est choisi à partir de trois scénarios, construits sur la base d'une revue de littérature des travaux empiriques (voir le Tableau 3 de l'Annexe 1 ci-dessous). Le compte central est finalement complété par le calcul des cales qui garantissent la cohérence du modèle théorique avec les données sous-jacentes.

3.1 Données de prix par type d'énergie et de bouquet énergétique

Deux comptes centraux ont été considérés, construits à partir des deux scénarios de la deuxième version de la Stratégie nationale bas carbone (SNBC2), qui est la feuille de route de la France pour décarboner son économie¹². Le premier scénario, dit « avec mesures existantes » (AME par la suite), porte sur l'ensemble des mesures prises par l'État jusqu'au 1^{er} juillet 2017¹³ afin de réduire les émissions de CO₂. Le second, dit « avec mesures supplémentaires » (AMS par la suite) décrit une trajectoire visant à respecter les objectifs intermédiaires de décarbonation et d'atteindre la neutralité carbone en 2050. Les deux scénarios se distinguent par les chroniques de projection de prix et de consommation finale en énergie (en volume en tonne équivalent pétrole), pour chaque type d'énergie sur la période 2020-2050, pour chacun des deux agents considérés (ménages et entreprises). Ces séries proviennent des sorties du modèle d'équilibre général calculable multisectoriel néo-keynésien de l'économie française, ThreeME, développé conjointement par l'Ademe et l'OFCE, qui a été mobilisé pour l'évaluation *ex ante* de l'impact macroéconomique et climatique de la SNBC2. Ces deux scénarios pourront être mis à jour à partir des travaux de troisième version de la SNBC, prévue pour 2024.

Ces deux scénarios sont couplés aux données historiques sur la période 1985-2019, provenant de l'OCDE (pour la période 1985-2010) et du Ministère de la Transition écologique (pour la période 2011-2019), pour pouvoir notamment étudier l'évolution des cales a_{it} (voir *infra*). Ces deux bases fournissent des données par secteurs d'activité – au nombre de cinq, industrie, transports, résidentiel, tertiaire et agriculture – de sorte que des hypothèses de ventilation doivent être faites pour avoir une distinction entre ménages et entreprises cohérente avec les données en projection. Les ménages correspondent ainsi à la totalité de la consommation énergétique du secteur résidentiel et à 40 % de celle du secteur des transports¹⁴ (en volume exprimé en tonne équivalent pétrole et en unité monétaire). Les entreprises agrègent l'agriculture, l'industrie, les 60 % restants des transports et le tertiaire duquel est exclu les services non-marchands au prorata de leur poids dans la valeur ajoutée de ce secteur d'activité (environ 30 % en moyenne chaque année).

¹² Il s'agit de la dernière révision disponible, rendue publique en 2020. Une nouvelle révision est en cours, qui permettra une actualisation du module.

¹³ Cette date a été retenue par le ministère de la transition écologique pour l'évaluation de la SNBC2.

¹⁴ Source : DGDDI (2019) ; calculs DG Trésor.

Les graphiques 1 et 2 de l'Annexe 3 décrivent l'évolution du bouquet énergétique calculé à partir des données de consommation finale en énergie dans les scénarios AME et AMS respectivement. Dans le cadre du scénario AME, la part du pétrole diminue environ de 10 points de pourcentage sur la période 1985 – 2050 au profit principalement de l'électricité, qui voit sa part augmenter de quasiment autant. Le scénario AMS montre des évolutions qualitativement similaires, mais avec des dynamiques beaucoup plus importantes. En particulier, le pétrole diminue de plus de 25 p.p. au profit de l'électricité, traduisant une électrification de l'économie supposée dans ce scénario. Le gaz augmente aussi légèrement sur l'intervalle de temps considéré, du fait d'une substitution du biogaz et de la cogénération au gaz naturel. En outre, les deux scénarios se distinguent par des trajectoires de prix pour chaque type d'énergie différenciées, avec, dans les deux cas, une forte accélération des prix des énergies fossiles relativement au prix de l'électricité.

3.2 Élasticité de substitution

L'hypothèse d'une fonction CES imbriquée à deux niveaux nécessite de fixer la valeur des deux élasticités de substitution, entre l'électricité et un agrégat des énergies fossiles, et entre les trois types d'énergies fossiles (charbon, pétrole et gaz). Les élasticités sont choisies sur la base i) de trois travaux empiriques (Papageorgiou *et al.*, 2015, Malikov *et al.*, 2017 et Ara, 2020) sur les élasticités de substitution entre énergies renouvelable et non-renouvelable pour le premier niveau de la fonction – en faisant l'hypothèse que l'électricité est assimilable à une énergie renouvelable en France –, et ii) de la méta-analyse de Stern (2012) qui porte sur les élasticités de substitution entre chaque paire possible des quatre énergies considérées pour le second niveau. Le Tableau 1 ci-dessous présente une synthèse de ces travaux. Trois calibrages sont considérés, selon que les élasticités sont minimales, moyennes ou maximales :

- L'élasticité de substitution entre l'électricité et l'agrégat des énergies fossiles est calculée comme le minimum, la moyenne et le maximum respectivement parmi les estimations proposées par les trois articles empiriques.
- L'élasticité de substitution entre les trois énergies fossiles correspond au minimum, au résultat principal et au maximum parmi les estimations de Stern (2012). En outre, la méta-analyse fournit des estimations par paire d'énergie alors que le module nécessite une élasticité de substitution entre les trois énergies fossiles. Il a donc été fait le choix de prendre systématiquement la moyenne sur les trois élasticités (entre charbon et pétrole, charbon et gaz et pétrole et gaz) pour chacun des trois jeux.

Tableau 1 : Revue de littérature des travaux empiriques

Article	Pays	Secteur(s)	Période	Source(s)	Fonction sous-jacente	Type d'élasticité de substitution
Papageorgiou <i>et al.</i> (2015)	26 pays de l'OCDE	Production d'électricité et secteur marchand hors énergie	1999-2009	IEA et WIOD	CES et trans-log	Hicks
Malikov <i>et al.</i> (2017)	26 pays de l'OCDE	Production d'électricité et secteur marchand hors énergie	1999-2009	IEA et WIOD	Non-paramétrique	Allen-Uzawa
Ara (2020)	France	Industries manufacturières	1999-2010	EACEI et FARE	CES	Hicks
Stern (2012)	Pays de l'OCDE, Chine, Inde, Corée du Sud, Koweït, Pakistan, Thaïlande	Ensemble de l'économie ou industries	N.S.	N.S.	Méta-analyse d'un ensemble de travaux empiriques	Shadow elasticity of substitution

Note : La définition des différentes élasticités de substitution est discutée dans la revue de littérature consacrée (voir l'Annexe 2 sur les revues de littérature).

Le Tableau 2 présente les élasticités de substitution retenues pour chacun des trois jeux considérés. L'absence de travaux empiriques sur les élasticités de substitution pour les ménages contraint à utiliser les mêmes valeurs pour les deux types d'agents considérés.

Tableau 2 : Calibrage des élasticités de substitution

Élasticités de substitution	Valeur	Sources
Électricité vs. énergies fossiles	2,5 (1,2 / 6,1)	Papageorgiou <i>et al.</i> (2015), Malikov <i>et al.</i> (2017) et Ara (2020)
Charbon vs pétrole vs gaz	1,1 (0,4 / 2,8)	Stern (2012)

Note : Le premier chiffre correspond à la valeur moyenne. Les deux chiffres entre parenthèses correspondent respectivement aux valeurs minimale et maximale.

3.3 Calcul des cales

La construction du compte central est complétée par le calcul des cales. Le modèle est inversé de sorte que les cales deviennent les variables endogènes à la place de la part de chaque énergie dans la consommation totale d'énergie, pour chaque agent (voir *supra*). Les variables des cales visent à garantir la cohérence des données (en matière de bouquet énergétique, de prix et d'élasticité de substitution) avec le modèle théorique sous-jacent qui définit les équations de demande pour chaque type d'énergie. Ces variables capturent par ailleurs tous les effets hors-prix relatifs aux changements relatifs de préférence, au progrès technique, etc. pour chaque énergie dans le bouquet.

L'évolution des cales est présentée dans les graphiques 3 et 4 de l'Annexe 3, respectivement pour les scénarios AME et AMS, pour les trois jeux d'élasticité de substitution retenus. Dans le scénario AME, les cales sont relativement stables pour tous niveaux d'élasticités. Il apparaît tout de même une augmentation légère de la cale associée au pétrole et une diminution de celle de l'électricité. Cela pourrait résulter d'une forme de rigidité dans l'utilisation du pétrole, qui se traduit par un ajustement de sa part dans le bouquet moins importante que la hausse de son prix, et réciproquement pour l'électricité.

Dans le scénario AMS, les jeux d'élasticités ont un impact sur l'évolution des cales. En particulier, pour le jeu d'élasticité « min », on observe une diminution drastique de la cale associée au pétrole au profit d'une augmentation des cales d'électricités et du gaz. Ce comportement des cales pourrait être expliqué par une variation plus que proportionnelle du bouquet due à la substituabilité faible entre les énergies fossiles, comparée à l'évolution des prix.

3.4 Coefficient d'émissions carbone

Les coefficients d'émissions carbone sont appliqués à chaque type d'énergie pour calculer les émissions totales. Ils sont indépendants du type d'agents considéré : les coefficients correspondent aux émissions physiques pour chaque type d'énergie. Par exemple, une tonne d'équivalent pétrole de charbon émet 3,25 tonnes de CO₂. Ils peuvent par ailleurs évoluer au cours du temps en fonction de la structure de production et de la consommation en chaque type d'énergie. C'est le cas pour l'électricité (avec le développement des énergies bas-carbones) et le gaz (avec la substitution du biogaz et de la cogénération au gaz naturel). Les coefficients ont été ajustés hors modèle sur la base des données de l'Ademe et de RTE. Il sera nécessaire de s'assurer de la cohérence de ces coefficients avec le compte central retenu (AME ou AMS). Le Tableau 1 dans l'Annexe 3 présente l'évolution de ces coefficients.

4. Cahier de variantes sur la base du scénario AME avec les élasticités de substitution moyennes comme scénario de référence

Cette partie présente le comportement du module Mésange vert en réponse à cinq variantes exogènes cohérentes avec le modèle Mésange. Il s'agit d'une hausse (i) du prix du baril de pétrole, (ii) de la taxe carbone, (iii) de l'investissement public générique, (iv) de l'efficacité et (v) de la TVA. La méthode d'évaluation est la suivante :

- Le modèle Mésange a été projeté sur un sentier de croissance équilibré, qui sert de scénario de référence, ou compte central (terme retenu par la suite). Il se caractérise par une croissance identique i) de tous les volumes de l'économie (PIB, consommation, investissements, etc.) sur la base d'un rythme d'évolution constant imposé à la population active et à l'efficacité du travail, et ii) des grandeurs nominales (les prix associés aux différents volumes modélisés) selon un taux de croissance de 2 % par an.
- De manière analogue, Mésange vert est projeté selon les hypothèses décrites dans la partie 3 ci-dessus afin de construire un compte central propre au module. À la différence du modèle Mésange où un unique compte central est considéré, correspondant au sentier de croissance équilibré, six comptes centraux peuvent être considérés pour le module Mésange vert, définis selon deux critères, i) le choix du scénario de référence (AME ou AMS) et ii) le choix du jeu d'élasticités de substitution entre énergies (minimales, moyennes ou maximales).
- Un choc sur une variable exogène du modèle Mésange est ensuite réalisé. Tous les chocs présentés par la suite sont permanents et constants (hausse de 1 pt de PIB *ex ante* pour la taxe carbone, l'investissement public générique et la TVA, hausse de 10\$ du prix du baril et hausse de 1 % de l'efficacité du travail).
- La réponse des variables du modèle Mésange aux chocs est évaluée en écart à leur valeur dans le sentier de croissance équilibré. Il s'agit alors des variantes analytiques usuelles, présentées dans le document de travail présentant Mésange¹⁵.
- Ces variantes sont ensuite évaluées avec le module Mésange vert, sur la base i) de la réponse des volumes de consommations énergétiques (finales des ménages et intermédiaires des entreprises) issue du modèle Mésange et ii) de chocs sur les variables exogènes (prix des énergies et/ou cales) calibrés de manière cohérente avec le choc réalisé dans le modèle Mésange (voir *infra* pour les méthodes de calibrage retenues pour chaque variante).
- La réponse des variables du module Mésange vert (bouquet énergétique et émissions CO₂) est finalement évaluée en écart à leur valeur dans le scénario de référence retenu. Ces résultats supplémentaires viennent ainsi compléter les sorties du modèle Mésange.

Il convient de noter que les variantes présentées ici constituent des chocs analytiques destinés à étudier le comportement du module Mésange vert, sur la base d'un nombre limité de variables exogènes choquées. L'utilisation courante du module, comme du modèle Mésange, nécessite en général de combiner plusieurs chocs, dont les chroniques ne sont pas constantes. En outre, dès lors que les chocs sont d'ampleur limitée, comme c'est le cas dans cette partie, la linéarité du modèle et du module est garantie et le décalage de date d'initialisation du choc entre le modèle et le module, respectivement 2015 et 2020, n'a pas d'incidence. Dans le cahier de variantes présenté ci-dessous, le compte central retenu est le scénario AME avec le jeu d'élasticités de substitution moyennes. Pour la variante pétrole, les résultats pour le scénario AMS et les autres jeux d'élasticités de substitution pour les deux scénarios sont également présentés à titre illustratif.

¹⁵ Voir Bardaji *et al.* (2017).

Les résultats obtenus à partir des cinq autres comptes centraux sont présentés dans les Annexes 5 à 8.

4.1 Variante pétrole

Tableau 3 : Hausse permanente du prix du baril de pétrole de 10\$

	2030	2035	2040	2045	2050
PIB en volume (en % en écart au compte central)	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2
Consommations finales d'énergie des ménages (% en écart au compte central)	-1,8	-1,8	-1,8	-1,8	-1,8
Consommations intermédiaires d'énergie des entreprises (% en écart au compte central)	-1,1	-1,1	-1,1	-1,1	-1,1
Hausse du prix du pétrole (% en écart au compte central)	13	13	13	13	13
Prix de l'électricité (% en écart au compte central)	-1,2	-1,2	-1,2	-1,2	-1,3
Prix du charbon (% en écart au compte central)	0	0	0	0	0
Prix du pétrole (% en écart au compte central)	13,1	13,1	13,1	13,2	13,2
Prix du gaz (% en écart au compte central)	-1,4	-1,4	-1,5	-1,5	-1,6
Part de l'électricité dans le bouquet énergétique (pts en écart au compte central)	4,8	4,9	5	5,1	5,3
Part du charbon dans le bouquet énergétique (pts en écart au compte central)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Part du pétrole dans le bouquet énergétique (pts en écart au compte central)	-5,8	-5,8	-5,9	-5,9	-5,9
Part du gaz dans le bouquet énergétique (pts en écart au compte central)	1	0,9	0,8	0,7	0,6
Prix de l'énergie (% en écart au compte central)	6,2	5,9	5,5	4,9	4,2
Consommation d'énergie (% en écart au compte central)	-1,8	-1,6	-1,4	-1,1	-0,7
Emissions de CO ₂ (% en écart au compte central)	-8,1	-8,9	-9,8	-10,9	-12,2

Source : *Mésange et Mésange vert* ; calcul DG Trésor.

Note : Les trois premières lignes du tableau correspondent aux chroniques issues de *Mésange*, utilisées pour calibrer *Mésange vert*. Le compte central correspond au scénario AME avec le jeu d'élasticités de substitution moyennes. Les prix de chaque énergie par agent sont exogènes, mais les prix agrégés sur l'ensemble des agents, présentés ici de la ligne 5 à la ligne 8, sont endogènes : ils dépendent de l'évolution des bouquets énergétiques et de la consommation totale en énergie.

Mise en œuvre

La variante consiste à accroître le prix du baril de pétrole de 10\$ dans *Mésange*. Cette augmentation est équivalente à une variation du prix de +13 % et représente une hausse de la facture énergétique *ex ante* de 0,2 pt de PIB. Il s'agit à la fois d'un choc d'offre (augmentation des coûts de production pour les entreprises) et d'un choc de demande (baisse du pouvoir d'achat des ménages). Dans le cadre de cette variante, l'environnement international de prix étrangers et de demande mondiale est supposé inchangé. Dans *Mésange vert*, ce choc est directement traduit dans le prix du pétrole pour les ménages et les entreprises, les prix des autres énergies étant inchangés. Cet effet prix est complété par une baisse du niveau de consommations, finale des ménages et intermédiaires des entreprises, en énergie, induite par le double choc négatif de demande et d'offre dans *Mésange*.

Mécanismes

Dans Mésange, à court terme, ce choc se traduit par une baisse immédiate du pouvoir d'achat et de la consommation des ménages, tandis que les entreprises font face à une hausse de leurs coûts de production qu'elles répercutent sur leurs prix de vente. La hausse des coûts se propage par la suite aux entreprises situées en aval de la chaîne de valeur, mais également aux salaires *via* la boucle prix-salaire. À moyen terme, la demande agrégée diminue, du fait de la baisse de la consommation et des investissements, et la compétitivité se dégrade avec le renchérissement des coûts de production. À long terme, la dégradation durable de la demande exerce des pressions baissières sur les prix et sur les salaires, limitant en partie la perte de compétitivité¹⁶.

Dans Mésange vert, la hausse relative du prix du pétrole incite les ménages et les entreprises à réduire leur consommation de cette énergie au profit des autres, et notamment de l'électricité. Dans la mesure où l'électricité est moins émettrice que les autres énergies fossiles, une diminution des émissions de CO₂ est observée, par ailleurs soutenue par la moindre consommation énergétique totale qui résulte de l'effet dépressif de la hausse du prix du pétrole.

Résultats

La hausse du prix du pétrole se traduit par une baisse durable de l'activité, et notamment de la consommation énergétique. En outre, les parts des énergies dans le bouquet varient significativement, avec une diminution pour le pétrole de 5,8 points de pourcentage par rapport au compte central compensée par une augmentation de 4,8 points pour l'électricité et de 1 point pour le gaz en 2030. Ces variations au compte central restent similaires à l'horizon 2050 avec une augmentation de 5,3 points de la part de l'électricité dans le bouquet énergétique et de 0,6 point pour le gaz, et d'une diminution de 5,9 points pour le pétrole. La substitution du pétrole vers l'électricité vient du choix d'élasticité dans la modélisation des CES imbriqués, avec une élasticité de substitution entre « renouvelables » (assimilés à l'électricité) et « non-renouvelables » (les trois autres énergies) plus importantes que pour l'élasticité de substitution entre les trois énergies fossiles. Ainsi, la baisse de la consommation énergétique totale, couplée à une substitution pétrole-électricité, a un impact baissier sur les émissions de CO₂ de l'ordre de -8 points en 2030 et de -12 points en 2050 par rapport au scénario sans choc.

Les tests de robustesse réalisés en considérant successivement les différents comptes centraux montrent que, pour le scénario AMS sans changer le jeu d'élasticités, les variations par rapport au compte central des parts de chaque énergie dans le bouquet sont similaires à celles du scénario AME en 2030. Elles sont toutefois légèrement moins importantes en 2050 avec une diminution de 4 points de pourcentage du pétrole comparé au compte central et une augmentation de 4,4 points de pourcentage pour la part de l'électricité. De plus, contrairement au scénario AME, la part du gaz diminue de 0,4 point de pourcentage comparé au compte central à l'horizon 2050. Cette différence dans les résultats provient d'un rythme de réduction de l'utilisation du pétrole et d'augmentation de l'utilisation de l'électricité beaucoup plus important dans le scénario AMS que dans le scénario AME, qui se traduit dans les cales. En particulier, pour les ménages, dans le scénario AMS, la cale pour le pétrole diminue, ce qui exerce une pression à la baisse sur l'élasticité de la part de cette énergie dans leur consommation énergétique à son prix (et réciproquement pour l'électricité).

¹⁶ Le modèle Mésange ne tient compte que de l'effet dépressif d'une hausse du prix du pétrole : un agrégat énergétique unique est modélisé. Il n'y a donc pas de substitution explicite entre différentes sources d'énergies, qui permettrait, *via* des investissements, de limiter à moyen/long terme les effets négatifs sur l'activité et l'emploi de ce choc.

Par ailleurs, en pourcentage en écart au compte central, l'évolution des émissions de CO₂ dépend quasi exclusivement du jeu d'élasticités de substitution retenu et non plus du scénario (AME ou AMS) : en choisissant le scénario AME, le choc peut être multiplié par cinq à horizon 2050 entre le jeu d'élasticité minimale (-5,5 %) et le jeu d'élasticité maximale (-27,6 %) (voir Graphique 1 de l'Annexe 4). De plus, le fait que les émissions baissent tendanciellement sur l'ensemble de la période en pourcentage en écart au compte central, alors que les chocs de prix et de consommation d'énergie se stabilisent rapidement, s'expliquent par le fait que les émissions continuent à diminuer dans le compte central¹⁷.

Une décomposition des évolutions des émissions CO₂ en pourcentage en écart au compte central en deux effets peut également être opérée, entre 1) la variation de l'intensité carbone moyenne du bouquet énergétique suite aux ajustements de la part de chaque énergie dans le bouquet énergétique et de leur intensité carbone respective, et 2) la variation de la consommation d'énergie totale. Les résultats sont présentés dans les graphiques 2 et 3 de l'Annexe 4. Ainsi, la variation des émissions de CO₂ provient principalement d'une variation de l'intensité carbone moyenne du bouquet énergétique. Cette conclusion est similaire quel que soit le scénario choisi.

4.2 Variante Taxe Carbone

Tableau 4 : Hausse de la taxe carbone de 1 pt de PIB *ex ante*

	2030	2035	2040	2045	2050
PIB en volume (en % en écart au compte central)	-0,6	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5
Consommations finales d'énergie des ménages (% en écart au compte central)	-8,8	-8,9	-8,9	-8,9	-8,8
Consommations intermédiaires d'énergie des entreprises (% en écart au compte central)	-1,7	-1,6	-1,6	-1,6	-1,6
Prix des consommations finales d'énergie des ménages (% en écart au compte central)	20,3	20,2	20,1	20,1	20,1
Prix des consommations intermédiaires d'énergie des entreprises (% en écart au compte central)	4,7	4,6	4,5	4,5	4,5
Prix de l'électricité (% d'écart au compte central)	1,5	1,4	1,2	1,1	0,9
Prix du charbon (% d'écart au compte central)	5	4,8	4,8	4,7	4,7
Prix du pétrole (% d'écart au compte central)	9,7	9,4	9	8,6	8,1
Prix du gaz (% d'écart au compte central)	6,1	5,5	5	4,4	3,9
Part de l'électricité dans le bouquet énergétique (pts d'écart au compte central)	4,9	4,9	4,8	4,7	4,6
Part du charbon dans le bouquet énergétique (pts d'écart au compte central)	0	0	0	0	0
Part du pétrole dans le bouquet énergétique (pts d'écart au compte central)	-3,7	-3,6	-3,6	-3,5	-3,4
Part du gaz dans le bouquet énergétique (pts d'écart au compte central)	-1,3	-1,2	-1,2	-1,2	-1,3
Prix de l'énergie (% d'écart au compte central)	7,5	6,9	6,2	5,4	4,5
Consommation d'énergie (% d'écart au compte central)	-6,6	-6,3	-5,8	-5,4	-4,9
Emissions de CO ₂ (% d'écart au compte central)	-11,8	-11,7	-11,5	-11,4	-11,2

Source : *Mésange et Mésange vert* ; calcul DG Trésor.

Note : Les quatre premières lignes du tableau correspondent aux chroniques issues de *Mésange vert*. Le compte central correspond au scénario AME avec le jeu d'élasticités de substitution moyennes. Les prix de chaque énergie par agent sont exogènes, mais les prix agrégés sur l'ensemble des agents, présentés ici de la ligne 5 à la ligne 8, sont endogènes : ils dépendent de l'évolution des bouquets énergétiques et de la consommation totale en énergie.

¹⁷ Il s'agit d'un effet dénominateur : si la baisse des émissions se stabilise en niveau en écart au compte central, elles peuvent continuer de diminuer lorsque le calcul est réalisé en pourcentage en écart au compte central dès lors que les émissions dans les scénarios AME et AMS continuent de baisser sur l'ensemble de la période de projection.

Mise en œuvre

Dans Mésange, la variante consiste en une hausse de la fiscalité écologique équivalente à un point de PIB *ex ante* portant sur les ménages et les entreprises (pour 65 % et 35 % respectivement). L'évolution de consommations, finales des ménages et intermédiaires des entreprises, et leurs prix associés sont utilisés pour calibrer le module. Il est supposé que la hausse des prix énergétiques est uniformément répartie sur les trois énergies carbonées du bouquet (charbon, gaz et pétrole). Ce choix de modélisation s'explique par l'absence de taxe carbone exprimée en euro par tonne de CO₂ dans Mésange, qui ne peut être reliée au montant de taxe carbone en points de PIB sans faire un ensemble d'hypothèses sur les conditions initiales (état du bouquet énergétique, niveau de taxe carbone déjà en place et PIB). Si la hausse du prix est uniforme pour les énergies fossiles, elle diffère entre les ménages et les entreprises, respectivement de +20 % et de +5 %, du fait que le choc ne les touche pas de la même manière dans Mésange.

Mécanismes

Dans Mésange, une hausse de la fiscalité carbone va diminuer le niveau de consommations intermédiaires en énergie carbonée des entreprises du fait de la hausse de leurs coûts de production et de la diminution de la demande agrégée par bouclage macroéconomique. Les ménages sont également concernés, directement *via* la hausse du prix de leurs consommations énergétiques carbonées, mais aussi *via* la perte de revenus générée par la baisse de l'activité. À long terme, les ménages et les entreprises s'adaptent en partie à ce choc en diminuant leurs consommations d'énergie. Dans le module Mésange vert, le renchérissement du prix relatif des énergies fossiles conduit à une substitution en faveur de l'électricité, conduisant, avec la baisse de la consommation énergétique totale, à une réduction des émissions de CO₂.

Résultats

La hausse d'une taxe carbone se traduit par une baisse de l'activité de -0,6 pt de PIB en 2030, qui reflue légèrement à -0,5 pt en 2050. Les consommations énergétiques des ménages et des entreprises diminuent de façon significative (respectivement -9 % et -2 % en 2050). En outre, l'application d'une taxe uniforme sur les trois énergies fossiles conduit à ce que les parts du pétrole et du gaz dans le bouquet énergétique diminuent respectivement de 3,7 points de pourcentage et de 1,3 p.p. par rapport au compte central à l'horizon 2030, au profit de l'électricité. Ainsi, une hausse de la taxe carbone équivalente à 1 pt de PIB *ex ante* se traduit par une diminution des émissions de CO₂ par rapport au compte central de l'ordre de 11,8 % en 2030 et de 11,2 % à horizon 2050. Comme dans le cadre de la variante pétrole, cette diminution des émissions de CO₂ provient de la baisse de la consommation énergétique combiné à la décarbonation du bouquet énergétique.

Par ailleurs, le choix du jeu d'élasticités de substitution entre énergies a une incidence significative sur les résultats : avec le jeu d'élasticité minimale, la diminution de la part du pétrole dans le bouquet énergétique est de 1,6 p.p. et de 0,6 p.p. pour le gaz, tandis que, avec un jeu d'élasticité maximale, elle est de 7,9 p.p. pour le pétrole et de 3 p.p. pour le gaz en 2030. Ainsi, la diminution des émissions pour un jeu d'élasticités minimales est de 6,7 % en 2050 contre 22,2 % au même horizon pour un jeu d'élasticités maximales (voir l'Annexe 5).

4.3 Variante investissement public

Tableau 5 : Hausse de l'investissement public de 1 pt de PIB *ex ante*

	2030	2035	2040	2045	2050
PIB en volume (en % en écart au compte central)	0,5	0,5	0,4	0,3	0,3
Consommations finales d'énergie des ménages (% en écart au compte central)	1,3	1,1	1,1	1	1
Consommations intermédiaires d'énergie des entreprises (% en écart au compte central)	0,6	0,5	0,5	0,4	0,4
Prix des consommations finales d'énergie des ménages (% en écart au compte central)	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7
Prix des consommations intermédiaires d'énergie des entreprises (% en écart au compte central)	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7
Prix de l'électricité (% d'écart au compte central)	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8
Prix du charbon (% d'écart au compte central)	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7
Prix du pétrole (% d'écart au compte central)	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7
Prix du gaz (% d'écart au compte central)	1,5	1,6	1,7	1,8	1,8
Part de l'électricité dans le bouquet énergétique (pts d'écart au compte central)	0	0	0	0	0
Part du charbon dans le bouquet énergétique (pts d'écart au compte central)	0	0	0	0	0
Part du pétrole dans le bouquet énergétique (pts d'écart au compte central)	0	0	0	0	0
Part du gaz dans le bouquet énergétique (pts d'écart au compte central)	0	0	0	0	0
Prix de l'énergie (% d'écart au compte central)	1,4	1,5	1,6	1,7	1,7
Consommation d'énergie (% d'écart au compte central)	0,7	0,6	0,6	0,5	0,5
Emissions de CO ₂ (% d'écart au compte central)	0,7	0,6	0,5	0,5	0,5

Source : *Mésange et Mésange vert* ; calcul DG Trésor.

Note : Les trois premières lignes du tableau correspondent aux chroniques issues de *Mésange*, utilisées pour calibrer *Mésange vert*. Le compte central correspond au scénario AME avec le jeu d'élasticités de substitution moyennes. Les prix de chaque énergie par agent sont exogènes, mais les prix agrégés sur l'ensemble des agents, présentés ici de la ligne 5 à la ligne 8, sont endogènes : ils dépendent de l'évolution des bouquets énergétiques et de la consommation totale en énergie.

Mise en œuvre

La variante « Investissement public » consiste en une hausse de l'investissement public générique d'un point de PIB *ex ante* dans le modèle Mésange, réparti entre les différents secteurs, au prorata de la composition moyenne de l'investissement public total. Il s'agit d'un pur choc de demande, dans la mesure où l'investissement public ne contribue pas à améliorer le rendement du capital ou la productivité globale des facteurs. Il est également important de noter qu'il ne s'agit pas spécifiquement d'un choc d'investissement de décarbonation qui conduirait à réduire l'usage des énergies fossiles au profit de l'électricité et donc les émissions de carbone, lequel nécessiterait des hypothèses de modélisation supplémentaires. Ainsi, dans le module Mésange vert, la hausse des prix des consommations énergétiques résultant de ce choc de demande positif est appliquée à l'ensemble des prix des énergies.

Mécanismes

Dans le modèle Mésange, la hausse de l'investissement soutient l'activité et l'emploi par les effets multiplicateur et accélérateur usuels¹⁸, mais l'effet positif est en partie atténué par une éviction par les importations. Le surplus d'activité soutient la consommation, dont la composante énergétique (finales des ménages du fait de la hausse de leur revenu et intermédiaires des entreprises avec l'augmentation de l'activité), mais également les salaires et finalement les prix par le biais de la boucle prix-salaires. Cette augmentation des prix dégrade la compétitivité de l'économie, évinçant une partie significative du surplus d'activité. Ainsi, dans le module Mésange vert, l'augmentation de la consommation énergétique totale, en l'absence de modification de la composition du bouquet énergétique – le choc sur les prix étant identique pour toutes les énergies – se traduit par une hausse des émissions de CO₂.

Résultats

À horizon 2030, le rehaussement de l'activité est de 0,5 pt de PIB, limité par les effets d'éviction par les importations et par les prix. La hausse de la consommation totale d'énergie est de l'ordre de 0,7 % en 2030. Par ailleurs, la hausse de l'investissement, et donc de la demande agrégée, dont la consommation énergétique, conduit à une accélération du prix de l'énergie pour les ménages et les entreprises, qui atteint +1,3 % en 2030 et +1,7 % en 2050. Dans la mesure où il s'agit d'un investissement public générique et non d'un investissement en décarbonation, cette accélération est supposée uniforme sur toutes les énergies dans Mésange vert. Ainsi, les ménages et les entreprises ne font pas d'arbitrage entre les types d'énergie, et le bouquet énergétique reste inchangé après ce choc. Les émissions augmentent alors légèrement, de 0,7 pt en 2030 et de 0,5 pt en 2050 du fait du surplus de consommation énergétique. Il résulte également de cette hypothèse de modélisation que le choix du jeu d'élasticité n'a aucun impact sur les résultats, tandis que le choix du scénario n'a qu'un effet marginal. Le seul canal ayant un effet sur les émissions de CO₂ est la hausse de la consommation totale d'énergie (voir l'Annexe 6).

¹⁸ L'effet multiplicateur signifie que l'investissement génère un surplus d'activité et l'effet accélérateur désigne le fait que les variations de l'activité ont un impact sur l'investissement.

4.5 Variante Efficience

Tableau 6 : Hausse permanente de l'efficience de 1 %

	2030	2035	2040	2045	2050
PIB en volume (en % en écart au compte central)	0,6	0,7	0,8	0,8	0,8
Consommations finales d'énergie des ménages (% en écart au compte central)	0	0,1	0,1	0,1	0,2
Consommations intermédiaires d'énergie des entreprises (% en écart au compte central)	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7
Prix des consommations finales d'énergie des ménages (% en écart au compte central)	-0,5	-0,7	-0,7	-0,7	-0,8
Prix des consommations intermédiaires d'énergie des entreprises (% en écart au compte central)	-0,5	-0,7	-0,7	-0,8	-0,8
Prix de l'électricité (% d'écart au compte central)	-0,6	-0,7	-0,8	-0,8	-0,9
Prix du charbon (% d'écart au compte central)	-0,5	-0,6	-0,7	-0,7	-0,8
Prix du pétrole (% d'écart au compte central)	-0,5	-0,6	-0,7	-0,7	-0,8
Prix du gaz (% d'écart au compte central)	-0,7	-0,8	-0,9	-0,9	-0,9
Part de l'électricité dans le bouquet énergétique (pts d'écart au compte central)	0	0	0	0	0
Part du charbon dans le bouquet énergétique (pts d'écart au compte central)	0	0	0	0	0
Part du pétrole dans le bouquet énergétique (pts d'écart au compte central)	0	0	0	0	0
Part du gaz dans le bouquet énergétique (pts d'écart au compte central)	0	0	0	0	0
Prix de l'énergie (% d'écart au compte central)	-0,6	-0,7	-0,7	-0,8	-0,8
Consommation d'énergie (% d'écart au compte central)	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6
Emissions de CO ₂ (% d'écart au compte central)	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6

Source : Mésange et Mésange vert ; calcul DG Trésor.

Note : Les trois premières lignes du tableau correspondent aux chroniques issues de Mésange, utilisées pour calibrer Mésange vert. Le compte central correspond au scénario AME avec le jeu d'élasticités de substitution moyennes. Les prix de chaque énergie par agent sont exogènes, mais les prix agrégés sur l'ensemble des agents, présentés ici de la ligne 5 à la ligne 8, sont endogènes : ils dépendent de l'évolution des bouquets énergétiques et de la consommation totale en énergie.

Mise en œuvre

La variante « Efficience » consiste en une augmentation de 1 % de l'efficience du travail, qui s'apparente à un pur choc d'offre positif dans le modèle Mésange, augmentant l'activité et réduisant les prix. Comme pour la variante « investissement public », il est supposé que la baisse des prix de consommations énergétiques concomitante est uniforme entre tous les types d'énergies et aucun arbitrage n'est possible pour les deux agents. Une modélisation de l'efficience spécifique à certains secteurs, pour notamment modéliser des gains d'efficacité énergétique, nécessiterait des hypothèses supplémentaires. Dès lors, les variations des émissions de CO₂ dépendent exclusivement de l'évolution de la consommation énergétique totale.

Mécanismes

Dans Mésange, à court terme, étant donné la rigidité initiale de la demande, les entreprises vont diminuer leur niveau d'emploi suite à cette augmentation de la productivité. Par conséquent, la consommation finale des ménages diminue, du fait d'une épargne de précaution face à la hausse du chômage, et donc leur consommation énergétique également. À l'inverse, le surplus d'activité soutient immédiatement les consommations intermédiaires énergétique des entreprises. La baisse des coûts de production, en premier lieu du travail qui résulte de la hausse du chômage, conduit à une diminution des prix, qui soutient la compétitivité de l'économie. Par ailleurs, cette diminution des prix étant plus marquée que celle des salaires, le revenu disponible réel des ménages augmente à moyen terme, soutenant donc leur consommation, dont la composante énergétique. L'activité est alors durablement soutenue par la hausse de la demande agrégée et par la baisse des prix, et la consommation énergétique totale augmente. Ainsi, dans le module Mésange vert, une hausse de l'efficience, en l'absence de modification de la composition du bouquet énergétique – le choc sur les prix étant identique pour toutes les énergies – se traduit par une hausse des émissions de CO₂.

Résultats

L'activité est durablement rehaussée, de 0,6 pt de PIB en 2030 et de 0,8 pt en 2050. À horizon 2030, l'impact sur la consommation énergétique des ménages est nul, tandis que les consommations intermédiaires énergétiques des entreprises augmentent de 0,6 pt. En 2050, les consommations d'énergie des ménages et des entreprises augmentent respectivement de 0,2 % et de 0,7 %. Ce choc a pour effet une diminution générale des prix, qui est uniformément répartie sur les prix des énergies du bouquet, de l'ordre de -0,8 pt relativement au compte central en 2050. Cette diminution de prix est commune aux ménages et aux entreprises. Ainsi, en l'absence d'effet de substitution entre énergie, les émissions de CO₂ sont rehaussées de 0,6 % par rapport au compte central à l'horizon 2050. Comme pour le choc d'investissement public, le jeu d'élasticité n'a aucun effet sur le résultat final et le scénario retenu n'a qu'un effet marginal (voir l'Annexe 7).

4.6 Variante TVA

Tableau 7 : Hausse de la TVA de 1 pt de PIB *ex ante*

	2030	2035	2040	2045	2050
PIB en volume (en % en écart au compte central)	-0,8	-0,7	-0,7	-0,7	-0,7
Consommations finales d'énergie des ménages (% en écart au compte central)	-2,5	-2,5	-2,5	-2,5	-2,5
Consommations intermédiaires d'énergie des entreprises (% en écart au compte central)	-0,7	-0,7	-0,7	-0,7	-0,7
Prix des consommations finales d'énergie des ménages (% en écart au compte central)	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Prix des consommations intermédiaires d'énergie des entreprises (% en écart au compte central)	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4
Prix de l'électricité (% d'écart au compte central)	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2
Prix du charbon (% d'écart au compte central)	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4
Prix du pétrole (% d'écart au compte central)	1,2	1,1	1,1	1	0,9
Prix du gaz (% d'écart au compte central)	1,3	1,2	1,1	1,1	1
Part de l'électricité dans le bouquet énergétique (pts d'écart au compte central)	0	0	0	0	0
Part du charbon dans le bouquet énergétique (pts d'écart au compte central)	0	0	0	0	0
Part du pétrole dans le bouquet énergétique (pts d'écart au compte central)	0	0	0	0	0
Part du gaz dans le bouquet énergétique (pts d'écart au compte central)	0	0	0	0	0
Prix de l'énergie (% d'écart au compte central)	1,3	1,2	1,1	1,1	1
Consommation d'énergie (% d'écart au compte central)	-1,4	-1,3	-1,3	-1,3	-1,2
Emissions de CO ₂ (% d'écart au compte central)	-1,4	-1,3	-1,3	-1,2	-1,2

Source : *Mésange et Mésange vert* ; calcul DG Trésor.

Note : Les trois premières lignes du tableau correspondent aux chroniques issues de *Mésange*, utilisées pour calibrer *Mésange vert*. Le compte central correspond au scénario AME avec le jeu d'élasticités de substitution moyennes. Les prix de chaque énergie par agent sont exogènes, mais les prix agrégés sur l'ensemble des agents, présentés ici de la ligne 5 à la ligne 8, sont endogènes : ils dépendent de l'évolution des bouquets énergétiques et de la consommation totale en énergie.

Mise en œuvre

La variante « TVA » consiste en une augmentation permanente des recettes de TVA d'un montant de 1 pt de PIB *ex ante* dans le modèle *Mésange*. Une hausse de la TVA s'apparente à un choc de demande à court terme, du fait de l'augmentation des prix qui diminue le pouvoir d'achat des ménages, auquel s'ajoute un choc d'offre à long terme provoqué par l'écart d'évolution entre les prix de valeur ajoutée et les prix de demande, avec notamment un renchérissement du coût du capital réel qui obère la croissance de l'investissement. Comme pour les deux variantes précédentes, « investissement public » et « efficacité », il est fait l'hypothèse que la hausse du prix de la consommation d'énergie totale induite par la hausse de la TVA est uniformément répartie entre tous les prix des différents types d'énergie et les variations des émissions de CO₂ dépendent exclusivement de l'évolution de la consommation énergétique totale.

Mécanismes

Dans Mésange, la TVA s'ajoute comptablement aux prix hors taxes de sorte que, à court terme, toute hausse se répercute instantanément et intégralement dans les prix de demande, dont les prix de consommations énergétiques finales des ménages et intermédiaires des entreprises. La hausse des prix de demande dégrade le pouvoir d'achat des ménages (*via* les prix de consommation) et renchérit le coût du capital réel (*via* les prix d'investissement). L'activité est alors durablement dépréciée du fait de la baisse de la demande agrégée. À moyen/long terme, la compétitivité de l'économie s'améliore toutefois dans la mesure où les salaires diminuent avec la hausse du chômage et avec la baisse des prix de VA, limitant la baisse de l'activité. Ainsi, dans le module Mésange vert, une hausse de la TVA implique une réduction des émissions de CO₂, *via* la baisse de l'activité, à bouquet énergétique inchangé.

Résultats

Consécutivement à la hausse de la TVA, l'activité est durablement diminuée, de -0,8 pt de PIB en 2030 et -0,7 pt de PIB en 2050. La hausse des prix induite touche davantage la consommation finale d'énergie, de sorte que les ménages endurent la plus forte accélération des prix des différentes énergies, de l'ordre de +2,5 % par rapport au compte central, contre une accélération de 0,4 % pour les entreprises, en 2050. Cette accélération des prix est associée à une diminution de la consommation totale, dont énergétique, conduisant à une diminution des émissions de CO₂ de l'ordre de -1,2 % par rapport au compte central à l'horizon 2050.

En outre, à l'instar des variantes « Investissement public » et « Efficience », il est fait l'hypothèse que la hausse de la TVA s'applique uniformément aux différents types d'énergies. Le bouquet énergétique ne change donc pas. Aucun arbitrage ne peut être fait par les ménages et les entreprises, et le choix du jeu d'élasticité n'aura aucun effet. L'absence de variations des énergies dans le bouquet implique que la diminution des émissions de CO₂ provient uniquement de la variation de la consommation agrégée (voir l'Annexe 8).

5. Travaux futurs et extensions envisageables

Plusieurs pistes de travaux sont envisagées pour améliorer le module Mésange vert :

- **L’empreinte carbone pourrait être substituée aux émissions carbone nationales.** Il s’agirait d’ajouter les émissions liées aux importations hors énergie (ce qui suppose de faire des hypothèses supplémentaires sur le contenu énergétique des importations) et de soustraire les émissions des exportations hors énergie.
- **Les émissions non-industrielles / hors énergies pourraient être ajoutées,** par exemple en supposant que les secteurs concernés (e.g. l’agriculture) varient avec le PIB et en supposant un coefficient d’émissions donné.
- **Une distinction entre des élasticités de court vs long terme pourrait être faite,** par exemple *via* une modélisation des équations de demande sous la forme de modèle à correction d’erreur, tel qu’utilisé dans le modèle Mésange.
- **Une décomposition sectorielle plus fine pourrait être réalisée,** en distinguant par exemple les transports et le logement pour les ménages, et les différents secteurs d’activité des bilans énergétiques pour les entreprises (transports, industrie, agriculture et services marchands), avec des calibrages différents pour chacun de ces sous-secteurs.
- **Les prix de l’énergie exogènes pourraient être endogénéisés en explicitant un bloc d’offre.** Par exemple, le bouclage macroéconomique sur l’offre pourrait être pris en compte *via* des variables supplémentaires issues de Mésange (PIB, investissement, autre), voire en considérant la rétroaction sur Mésange (où la modification du bouquet implique un ajustement du prix de l’énergie qui rétroagirait sur le choc à calibrer dans Mésange).
- **Les taxes et les taux de marge pourraient être explicités.** Il s’agirait de partir des hypothèses de prix HT pour chaque type d’énergie (e.g. celles de la Commission européenne pour la SNBC3) auxquels seraient ajoutées ces différentes variables pour calculer les prix TTC des entreprises et des ménages.
- **Des alternatives pour modéliser les effets hors-prix pourraient être considérées.** Ces effets sont actuellement capturés par les cales. Une spécification alternative pourrait consister à ajouter un facteur de qualité explicite, en sus de ces variables. Cette approche est notamment utilisée dans les modèles de commerce international (voir, par exemple, Crozet *et al.*, 2011), mais elle suppose d’avoir des conditions supplémentaires sur la production d’énergie. L’approche peut être pertinente si on considère l’empreinte carbone, qui nécessite d’explicitement la production d’énergie et les importations.

Bibliographie

- Acemoglu D., Akcigit U., Hanley D. et Kerr W. (2016), "Transition to clean technology", *Journal of Political Economy*, 124(1):52–104.
- Alestra C., Cette G., Chouard V. et Lecat R. (2020), "Advanced Climate Change Long-term model (ACCL) : un outil de modélisation des risques climatiques", Banque de France, *Document de travail*, n° 759.
- Ara J. (2020), "The elasticity of substitution between clean and dirty energy with technological bias", *Economics Working Paper Series*, No. 20/344, ETH Zurich, CER-ETH - Center of Economic Research, Zurich.
- Bardaji J., Campagne B., Khder M.-B., Lafféter Q. et Simon O. (Insee), Dufernez A.-S., Elezaar C., Leblanc P., Masson E. et Partouche H. (2017), « Le modèle macroéconométrique Mésange : ré-estimation et nouveautés », *Document de travail DG Trésor*, n° 2017-04, mai 2017.
- Bello M. O., Solarin S. A. et Yen Y. Y. (2020), "Interfuel substitution, hydroelectricity consumption and CO₂ emissions mitigation in Malaysia: evidence from a transcendental logarithm (trans-log) cost function framework", *Environmental Science and Pollution Research*, 27:17162–17174.
- Böhringer C. et Müller A. (2014), "Environmental Tax Reforms in Switzerland: A Computable General Equilibrium Impact Analysis", *Swiss Journal of Economics and Statistics*.
- Bosetti V., De Cian E., Tavoni M. et Sgobbi A. (2009), "The 2008 Witch Model: New Model Features and Baseline", *FEEM Working Paper*.
- Burns A., Campagne B., Jooste C., Stephan D. et Thanh Bui T. (2019), "The World Bank Macro-Fiscal Model Technical Description", *Policy Research Working Paper*.
- Cambridge Econometrics (2019), "E3ME Technical Manual v6.1", Cambridge.
- Crozet M., Head K. et Mayer T. (2011), "Quality Sorting and Trade: Firm-level Evidence for French Wine", *The Review of Economic Studies*.
- Château J., R. Dellink et E. Lanzi (2014), "An Overview of the OECD ENV-Linkages Model: Version 3", *OECD Environment Working Papers*.
- Eyraud L. (2007), « Guide pratique des comptes chaînés », *Document de travail de la DGTPE*, n° 2007/04.
- Gantois T., Girard P.L., Le Gall G. (2022), « Évaluation de l'impact macroéconomique de la transition écologique : revue des modèles macro-environnementaux, usages et limites », *Document de travail de la DG Trésor*, n° 2022/2.
- Giraud G., Mc Isaac F., Bovari E. et Zatsepina E. (2016), "Coping with the Collapse: A Stock-Flow Consistent Monetary Macrodynamics of Global Warming", *AFD Working Paper*.
- In 't Veld J., Roeger W. et Varga J. (2021), "E-QUEST – A Multi-Region Sectoral Dynamic General Equilibrium Model with Energy Model Description and Applications to Reach the EU Climate Targets", European Commission.
- Hyland M. et Haller S. (2018), "Firm-level estimates of fuel substitution: an application to carbon pricing", *The Energy Journal*, 39(6).
- Jo A. (2020), "The elasticity of substitution between clean and dirty energy with technological bias", *CER-ETH Economics Working Paper Series*, 20.

- Jones C. T. (1995), "A dynamic analysis of interfuel substitution in us industrial energy demand", *Journal of Business & Economic Statistics*, pages 459–465.
- Kumar S., Fujii H. et Managi S. (2015), "Substitute or complement? Assessing renewable and nonrenewable energy in OECD countries", *Applied Economics*, 47(14):1438–1459.
- Li J. et Lin B. (2016), "Inter-factor/inter-fuel substitution, carbon intensity, and energy-related CO₂ reduction: Empirical evidence from China", *Energy Economics*, 56:483–494.
- Liu H., Tang Y. M., Iqbal W. et Raza H. (2022), "Assessing the role of energy finance, green policies, and investment towards green economic recovery", *Environmental Science and Pollution Research*, pages 1–14.
- Ma C. et Stern D. I. (2016), "Long-run estimates of interfuel and interfactor elasticities", *Resource and Energy Economics*, 46:114–130.
- Malikov E., Sun K. et Kumbhakar S. C. (2018), "Non-parametric estimates of the clean and dirty energy substitutability", *Economics Letters*, 168:118–122.
- Papageorgiou C., Saam M. et Schulte P. (2017), "Substitution between clean and dirty energy inputs: A macroeconomic perspective", *Review of Economics and Statistics*, 99(2):281–290.
- Raza M. Y. et Tang S. (2022), "Inter-fuel substitution, technical change, and carbon mitigation potential in Pakistan: Perspectives of environmental analysis", *Energies*, 15(22):8758.
- Reynès F., Callonnet G., Saussay A., Landa G., Malliet P., Gueret A., Hu J., Hamdi-Cherif M. et Gouédard H. (2021), "ThreeME Version 3 - Multi-sector Macroeconomic Model for the Evaluation of Environmental and Energy policy - A full description", OFCE.
- Shahiduzzaman M. et Alam K. (2013), "Changes in energy efficiency in Australia: a decomposition of aggregate energy intensity using logarithmic mean divisia approach", *Energy Policy*, 56:341–351.
- Smyth R., Narayan P. K. et Shi H. (2011), "Substitution between energy and classical factor inputs in the Chinese steel sector" », *Applied Energy*, 88(1):361–367.
- Sorrell S. (2014), "Energy substitution, technical change and rebound effects", *Energies*, 7(5):2850–2873.
- Steinbuks J. (2012), "Interfuel substitution and energy use in the UK manufacturing sector", *The Energy Journal*, 33(1).
- Stern D. I. (2011), "Elasticities of substitution and complementarity", *Journal of Productivity Analysis*, 36:79–89.
- Stern D. I. (2012), "Interfuel substitution: a meta-analysis", *Journal of Economic Surveys*, 26(2):307–331.

Annexe 1 : Tableaux de synthèse des revues de littérature sur les élasticités de substitution dans les modèles macro-environnementaux et leur estimation

Tableau 1 : Élasticité de substitution dans les modèles macro-environnementaux

Modèle	Élasticité	Fonction de Production	Source	Source
ENV LINKAGE	Inter-énergies	CES	GTAP 7.1	Calibré
ThreeME	Renouvelables/Non-Renouvelables et inter-fossile	CES	Stern (2009)	Estimé
ACCL	Renouvelables/Non-Renouvelables et inter-fossile	CES	Stern (2009) et Papageorgiou (2017)	Estimé
MFMod	Inter-énergies	CES	Carra and Marangoni	Estimé
E-QUEST	Inter-énergies	CES	Acemoglu <i>et al.</i> (2011)	Calibré
SWISSGEM-E	Inter-énergies	CES	Mohler and Müller (2012)	Estimé
WITCH	Renouvelables/Non-Renouvelables et inter-fossile	CES	Non-spécifié	Non-spécifié

Tableau 2 : Présentation détaillée des méthodes d'estimations des élasticités de substitution par article

Auteurs	Article	Base de données	Modèle	Estimation	Secteur	Période	Région
Jones (1995)	A Dynamic Analysis of Interfuel Substitution	State Energy Data report/ Monthly energy review/Annual energy review	Linear Logit / Translog	OLS	Agrégé/Prod. Énergie	1960-1992	US
Papageorgiou et Saam (2007)	Substitution between Clean and Dirty Energy	World input output database	CES / Translog	OLS/NLLS	Prod. Électricité/ autres secteurs	1995-2009	26 pays
Smyth, Narayan et Shi (2010)	Inter-fuel Substitution in the Chinese Iron and Steel Sector	NBSC	Translog	Ridge Regression	Secteur de l'acierie	1987-2007	Chine
Steinbuck (2010)	Interfuel Substitution and Energy Use in the UK	Department of Energy and Climate Change	Linear Logit	Seemingly unrelated regression	12 secteurs manufacturiers	1990-2005	Royaume-Uni
Shahiduzzaman et Alam (2013)	Interfuel substitution in Australia: a way forward to achieve environmental sustainability	ABARES /Australian Bureau of statistics / IMF	Translog	Seemingly unrelated regression	Agrégé/sectoriel	1968-2008	Australie
Kumar, Fujii et Managi (2014)	Substitute or complement? Assessing renewable and nonrenewable energy in OECD countries	EU-KLEMS / IEA	Fonction de distance	Maximum likelihood	Secteurs manufacturiers	1995-2009	OCDE
Hyland et Haller (2015)	Firm-level estimates of fuel substitution: An application to carbon pricing	Census of Industrial production for the republic of Ireland	Translog	Iterated seemingly unrelated regression	Firmes	2004-2009	Irlande
Ma et Stern (2016)	Long-run estimates of interfuel and interfactor elasticities	China Energy Yearbook	Translog	Between estimator / Difference Estimator	Agrégé	2000-2010	Chine
Malikov <i>et al.</i> (2018)	Nonparametric Estimates of the Clean and Dirty Energy Substitutability	World input output database	Non-parametric function	Generalized kernel regression	Prod. Électricité/ autres secteurs	1995-2009	26 pays
A. Jo (2020)	The Elasticity of Substitution between Clean and Dirty Energy with Technological Bias	EACEI / FICUS	CES	FNGLS	Secteurs manufacturiers	1994-2015	France
Bello, Solarin et Yen (2020)	Interfuel substitution, hydroelectricity consumption and CO ₂ emissions mitigation in Malaysia: Evidence from a transcendental logarithm (trans-log) cost function framework	Différents index de prix	Translog	Seemingly unrelated regression	Prod. Électricité	1988-2016	Malaisie
Yousaf Raza et Tang (2022)	Inter-Fuel Substitution, Technical Change, and Carbon Mitigation Potential in Pakistan: Perspectives of Environmental Analysis	Pakistan Energy YearBook / World Bank / Pakistan economic survey	Translog	Ridge Regression	Agrégé	1986-2019	Pakistan

Tableau 3 : Présentation des résultats des estimations des élasticités de substitution par article

Auteurs	Élasticité	Charbon-Pétrole	Charbon-Électricité	Charbon-Gaz	Pétrole-Charbon	Pétrole-Électricité	Pétrole-Gaz	Électricité-Charbon	Électricité-Pétrole	Électricité-Gaz	Gaz-Charbon	Gaz-Pétrole	Gaz-Électricité
Jones (1995)	CPE	[0,22 ; 0,45]	[0,17 ; 0,68]	[-0,26 ; 0,21]	[0,06 ; 0,14]	[-0,19 ; 0,06]	[0,07 ; 0,52]	[0,04 ; 0,08]	[-0,06 ; 0,08]	[0,14 ; 0,19]	[-0,11 ; 0,04]	[0,07 ; 0,44]	[0,24 ; 0,32]
Smyth, Narayan et Shi (2010)	Non-défini			0,77*							2,42*		
Steinbuck (2010)	CPE	0,08	0,32*	0,14*	0,05	0,31*	-0,02*	0,05*	0,07*	0,05*	0,07*	-0,01	0,18*
Shahiduzzaman et Alam (2013)	CPE	[0,3* ; 0,59*]	[-0,53* ; -0,31*]	[0,03 ; 0,09]	[0 ; 0,01*]	[0,02* ; 0,02*]	[0 ; 0,01]	[-0,01* ; -0,01*]	[-0,04* ; 0,06*]	[0 ; 0,01]	[0 ; 0,01]	[0 ; 0,03]	[-0,02 ; 0,03]
	MES	[0,32* ; 0,62*]	[-0,49* ; -0,27*]	[0,05 ; 0,12*]	[0,09* ; 0,1*]	[0,05* ; 0,06*]	[0,02 ; 0,04]	[0,08* ; 0,09*]	[0,06* ; 0,09*]	[0,01 ; 0,04]	[0,09* ; 0,1*]	[0,02 ; 0,06*]	[0,02 ; 0,06]
	AES	[0,45* ; 0,87*]	[-2,01* ; -1,14*]	[0,69 ; 1,77]		[0,06* ; 0,08*]	[0 ; 0,04]			[0,69 ; 1,8]			
Kumar, Fujii et Managi (2014)	MES	[-2,76 ; 0,14]	[-0,69 ; 0,64]	[-0,4 ; 0,02]	[-0,43 ; 0,37]	[-0,43 ; 0,37]	[-0,28 ; 0,06]	[-1,31 ; 0,43]	[-0,28 ; 6,4]	[-0,46 ; 0,27]	[-0,41 ; 0,15]	[-0,18 ; 0,15]	[-1,95 ; -0,17]
Hyland et Haller (2015)	CPE					0,24	0,39*		0,06	0,25*		0,33*	0,88*
Ma et Stern (2016)	CPE	[-0,11 ; -0,02]	[-0,3* ; -0,06*]	[-0,09 ; -0,02]	[-0,14 ; 0,04]	[-0,07* ; 0,44*]	[0 ; 0,77*]	[-0,14* ; 0,01]	[-0,16* ; -0,02]	[-0,03 ; 0,02]	[-0,20 ; -0,04]	[0 ; 1,35*]	[-0,14 ; 0,08]
	MES	[0 ; 0,06]	[0 ; 0,06]	[-0,06 ; 0]	[0,01 ; 0,78]	[0,01 ; 0,72*]	[0,04 ; 2,23*]	[0 ; 0,07]	[-0,07 ; 0]	[0,03 ; 0,23*]	[0,04 ; 1,61]	[0,06 ; 2,47]	[0,05 ; 1,67*]
	SES	[0,01 ; 0,46]	[0 ; 0,06]	[0,03 ; 1,11*]		[0 ; 0,51]	[0,05 ; 2,39*]			[0,05 ; 1,42]			

Note de lecture : Les astérisques (*) mettent en évidence les estimations significatives à 95 %.

Annexe 2 : Présentation des différentes spécifications des consommations énergétiques dans le module Mésange vert

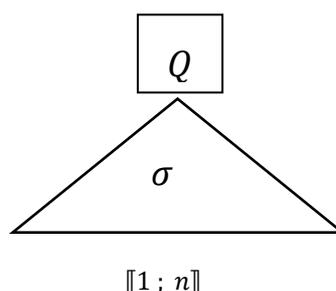
Cette annexe présente les implications du choix de la fonction de consommation sur les équations de demande qui interviennent dans le module Mésange vert, ainsi que sur le calcul des différentes élasticités. Quatre types de fonction sont considérés, 1) une fonction à élasticité de substitution de type Dixit-Stiglitz où les énergies se combinent selon une élasticité de substitution unique et constante, 2) une fonction à élasticité de substitution généralisée où les élasticités sont différentes pour chaque paire d'énergies possible, 3) une fonction imbriquée à trois niveaux, où sont successivement combinées des énergies renouvelables et non-renouvelables, des sous-ensembles au sein de chacune de ces catégories et finalement les énergies considérées, et 4) une fonction où les énergies sont imbriquées deux à deux.

1) CES simple ou généralisée

a) Représentation graphique de la fonction de production

La fonction de production d'une CES simple peut-être écrit comme suit :

$$Q(x_1, \dots, x_n) = \left(\sum_{i=1}^n a_i x_i^\sigma \right)^{\frac{1}{\sigma}}$$



Note : La CES simple utilise n différents intrants $(x_i)_{i \in [1; n]}$ pour produire le bien Q . σ désigne l'élasticité de substitution et a_i le facteur de pondération associé à l'intrant x_i .

La CES généralisée n'a pas de fonction de production sous-jacente explicite. La différence entre une CES simple et une CES généralisée porte sur l'élasticité de substitution : dans le cas généralisé, les élasticités de substitution sont différenciées entre chaque paire d'intrants possible.

La CES simple est par conséquent un sous-cas de la CES généralisée.

Équations des modèles pour calculer le bouquet énergétique

L'énergie 1 sert de référence. En utilisant les fonctions de demande, on peut écrire pour le cas généralisé :

$$\frac{\Omega_{i,t}}{\Omega_{1,t}} = \left(\frac{a_{i,t}}{a_{1,t}} \right)^{\sigma_{1i}} \left(\frac{P_{i,t}}{P_{1,t}} \right)^{-\sigma_{1i}}, \quad \forall i \in [2; n]$$

$$1 = \sum_{i=1}^n \Omega_{i,t}$$

Où $\Omega_{i,t} \equiv \frac{E_{i,t}}{E_t}$ et $E_t \equiv \sum_{i=1}^n E_{i,t}$.

Le cas d'une CES simple suppose simplement une élasticité de substitution unique.

Les variables endogènes sont : $\{\Omega_i\}$.

Remarques : les autres élasticités de substitution sont implicitement définies par rapport à l'énergie 1 ; du fait du théorème d'impossibilité, au moins une élasticité de substitution n'est pas constante ([lien](#))¹⁹ : le choix d'une énergie de référence n'est donc pas neutre car il détermine les élasticités calibrées. À noter : il y a $\frac{n(n-1)}{2}$ élasticités, et on peut ici en calibrer directement $(n-1)$, les $\frac{(n-2)(n-1)}{2}$ autres élasticités sont endogènes.

Les équations log-linéarisées sont – en supposant ici les cales constantes (sans perte de généralité), en notant $\hat{X}_{i,t} = d \log X_{i,t}$ pour toute variable endogène $X_{i,t}$:

$$\begin{aligned} \hat{\Omega}_{i,t} - \hat{\Omega}_{1,t} &= -\sigma_{1i}(\hat{p}_{i,t} - \hat{p}_{1,t}), \quad \forall i \in \llbracket 2 ; n \rrbracket \\ \sum_{i=1}^n \Omega_i \hat{\Omega}_{i,t} &= 0 \end{aligned}$$

On en déduit :

$$\begin{aligned} \hat{\Omega}_{1,t} &= \sum_{i=2}^n \Omega_i \sigma_{1i} (\hat{p}_{i,t} - \hat{p}_{1,t}) \\ \hat{\Omega}_{i,t} &= \sum_{j=2}^n [\Omega_j \sigma_{1j} (\hat{p}_{j,t} - \hat{p}_{1,t})] - \sigma_{1i} (\hat{p}_{i,t} - \hat{p}_{1,t}) \end{aligned}$$

b) Équations des modèles pour le calcul des cales

L'énergie 1 sert de référence. En utilisant les fonctions de demande, on peut écrire :

$$\frac{a_i}{a_1} = \left(\frac{\Omega_i}{\Omega_1} \right)^{\frac{1}{\sigma_{1i}}} \frac{P_i}{P_1}, \quad \forall i \in \llbracket 2 ; n \rrbracket$$

Et on normalise :

$$\sum_{i=1}^n a_i = 1$$

Les variables endogènes sont : $\{a_i\}$.

c) Impact d'un choc sur les prix de l'énergie

Sur la base des équations de demande log-linéarisées ci-dessus, on peut calculer les élasticités prix et les élasticités de substitution. Pour rappel, l'élasticité-prix croisée est définie par :

$$\gamma_{ij,t} \equiv \left. \frac{d \log \Omega_{i,t}}{d \log P_{j,t}} \right|_{\forall k \neq \{j\}, p_{k,t} \text{ constants}}$$

¹⁹ Par exemple, si $n=3$, l'élasticité de substitution entre 2 et 3 peut se déduire des deux équations de demande par rapport à 1, e.g.

$\frac{E_3}{E_2} = \frac{E_1}{E_2}$; cette élasticité dépend du rapport des prix.

Suite à un choc de prix, on a donc, pour l'énergie 1 :

$$\gamma_{1j} = \begin{cases} -\sum_{i=2}^n \Omega_i \sigma_{1i} & \text{si } 1 = j \\ \Omega_j \sigma_{1j} & \text{si } 1 \neq j \end{cases}$$

Pour l'énergie $i \neq 1$:

$$\gamma_{ij} = \begin{cases} -\sum_{i=2}^n [\Omega_i \sigma_{1i}] - \sigma_{1i} & \text{si } 1 = j \\ -(1 - \Omega_j) \sigma_{1j} & \text{si } i = j \\ \Omega_j \sigma_{1j} & \text{si } i \neq j, 1 \neq j \end{cases}$$

Par définition, l'élasticité de substitution (au sens de Hicks) entre deux énergies peut s'écrire :

$$\sigma_{ij,t} \equiv - \frac{d \log \Omega_{j,t} - d \log \Omega_{i,t}}{d \log P_{j,t} - d \log P_{i,t}} \Big|_{\forall k \neq \{i,j\}, p_{k,t} \text{ constants}}$$

Soit $j \neq 1$. On a ici :

$$\sigma_{ij,t} = \begin{cases} \frac{\sigma_{1j} d \log P_{j,t} - \sigma_{1i} d \log P_{i,t} - (\sigma_{1j} - \sigma_{1i}) d \log P_{1,t}}{d \log P_{j,t} - d \log P_{i,t}} & \text{si } i \neq 1 \\ \sigma_{1j} & \text{si } i = 1 \end{cases}$$

Dans le cas généralisé, les élasticités de substitution ne sont donc pas toutes constantes.

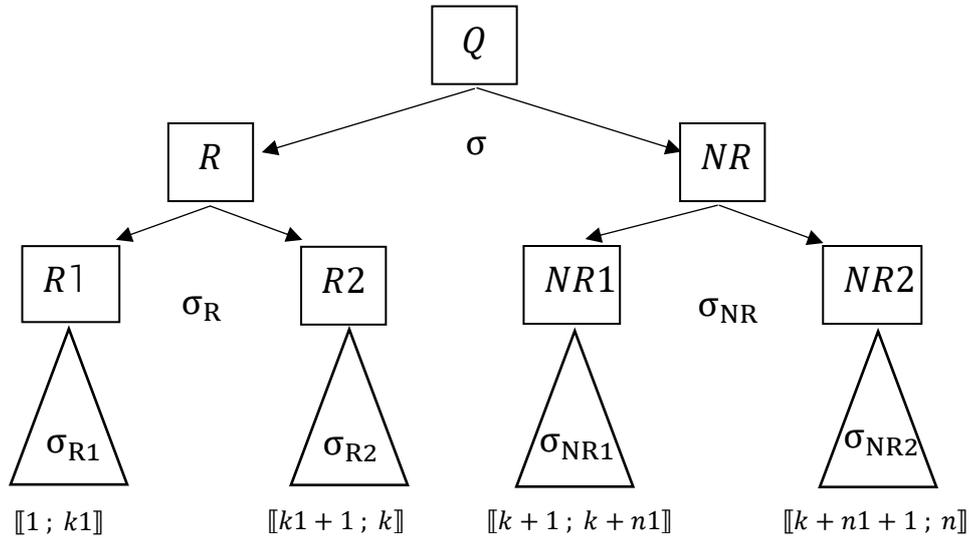
Dans le cas simple, on retrouve bien une élasticité constante pour toutes les définitions possibles de l'élasticité de substitution.

Remarque (théorème de l'impossibilité) : une élasticité de substitution constante entre i et j requiert que $\sigma_{1i} = \sigma_{1j} = \sigma_{ij}$. En généralisant à l'ensemble des paires, on voit bien qu'on retrouve le cas de la CES simple avec $\sigma_{ij} = \sigma$ pour toute paire (i, j) .

2) CES imbriquée à 3 niveaux

a) Représentation graphique de la fonction de production

Dans le cas d'une fonction CES imbriquée à trois niveaux, trois sous-ensembles d'énergies sont définis : R vs NR, et R1 vs R2, NR1 vs NR2, et finalement un nombre arbitraire d'énergies au sein de ces quatre sous-ensembles. Il y a k énergies renouvelables, dont $k1$ appartiennent au groupe R1, et $n-k$ énergies non-renouvelables, dont $n1$ appartiennent au groupe NR1.



Note : La production de Q dépend d'arbitrages à 3 niveaux différents.

b) Équations des modèles pour calculer le bouquet

Les équations de production imbriquée sont les suivantes :

$$Q(R_t, NR_t) = (a_{R,t} R_t^\sigma + a_{NR,t} NR_t^\sigma)^{\frac{1}{\sigma}}$$

$$R(R_{1,t}, R_{2,t}) = (a_{R1,t} R_{1,t}^{\sigma_R} + a_{R2,t} R_{2,t}^{\sigma_R})^{\frac{1}{\sigma_R}}$$

$$NR(NR_{1,t}, NR_{2,t}) = (a_{NR1,t} NR_{1,t}^{\sigma_{NR}} + a_{NR2,t} NR_{2,t}^{\sigma_{NR}})^{\frac{1}{\sigma_{NR}}}$$

$$R_1(R_{1,i,t}, \dots, R_{1,k1,t}) = \left(\sum_{i=1}^{k1} a_{i,t} R_{1,i,t}^{\sigma_{R1}} \right)^{\frac{1}{\sigma_{R1}}}$$

$$R_2(R_{2,k1+1,t}, \dots, R_{2,k,t}) = \left(\sum_{i=k1+1}^k a_{i,t} R_{2,i,t}^{\sigma_{R2}} \right)^{\frac{1}{\sigma_{R2}}}$$

$$NR_1(NR_{1,k+1,t}, \dots, NR_{1,k+n1,t}) = \left(\sum_{i=k+1}^{k+n1} a_{i,t} NR_{1,i,t}^{\sigma_{NR1}} \right)^{\frac{1}{\sigma_{NR1}}}$$

$$NR_2(NR_{2,k+n1+1,t}, \dots, NR_{2,n,t}) = \left(\sum_{i=k+n1+1}^n a_{i,t} NR_{2,i,t}^{\sigma_{NR2}} \right)^{\frac{1}{\sigma_{NR2}}}$$

Les énergies 1, $k1+1$, $k+1$, et $k+n1+1$ servent de référence. En utilisant les fonctions de demande, on peut écrire :

- Niveau 3 :

$$\frac{\Omega_{i,t}}{\Omega_{1,t}} = \left(\frac{a_{i,t}}{a_{1,t}} \right)^{\sigma_{R1}} \left(\frac{P_{i,t}}{P_{1,t}} \right)^{-\sigma_{R1}}, i \in \llbracket 2 ; k1 \rrbracket$$

$$\frac{\Omega_{i,t}}{\Omega_{k1+1,t}} = \left(\frac{a_{i,t}}{a_{k1+1,t}} \right)^{\sigma_{R2}} \left(\frac{P_{i,t}}{P_{k1+1,t}} \right)^{-\sigma_{R2}}, i \in \llbracket k1 + 1 ; k \rrbracket$$

$$\frac{\Omega_{i,t}}{\Omega_{k+1,t}} = \left(\frac{a_{i,t}}{a_{k+1,t}} \right)^{\sigma_{NR1}} \left(\frac{P_{i,t}}{P_{k+1,t}} \right)^{-\sigma_{NR1}}, i \in \llbracket k + 1 ; k + n1 \rrbracket$$

$$\frac{\Omega_{i,t}}{\Omega_{k+n1+1,t}} = \left(\frac{a_{i,t}}{a_{k+n1+1,t}} \right)^{\sigma_{NR2}} \left(\frac{P_{i,t}}{P_{k+n1+1,t}} \right)^{-\sigma_{NR2}}, i \in \llbracket k + n1 + 1 ; n \rrbracket$$

Si une branche est absente, l'équation correspondante est supprimée.

- Niveau 2 :

$$\frac{\Omega_{k1+1,t}}{\Omega_{1,t}} = \left(\frac{a_{R2,t} P_{R1,t}}{a_{R1,t} P_{R2,t}} \right)^{\sigma_R} \left(\frac{a_{k1+1,t} P_{R2,t}}{P_{k1+1,t}} \right)^{\sigma_{R2}} \left(\frac{a_{1,t} P_{R1,t}}{P_{1,t}} \right)^{-\sigma_{R1}}$$

$$\frac{\Omega_{k+n1+1,t}}{\Omega_{k+1,t}} = \left(\frac{a_{NR2,t} P_{NR1,t}}{a_{NR1,t} P_{NR2,t}} \right)^{\sigma_{NR}} \left(\frac{a_{k+n1+1,t} P_{NR2,t}}{P_{k+n1+1,t}} \right)^{\sigma_{NR2}} \left(\frac{a_{k+1,t} P_{NR1,t}}{P_{k+1,t}} \right)^{-\sigma_{NR1}}$$

$$P_{R1,t} = \left(\sum_{i=1}^{k1} a_{i,t}^{\sigma_{R1}} P_{i,t}^{1-\sigma_{R1}} \right)^{\frac{1}{1-\sigma_{R1}}}, \quad P_{R2,t} = \left(\sum_{i=k1+1}^k a_{i,t}^{\sigma_{R2}} P_{i,t}^{1-\sigma_{R2}} \right)^{\frac{1}{1-\sigma_{R2}}}$$

$$P_{NR1,t} = \left(\sum_{i=k+1}^{k+n1} a_{i,t}^{\sigma_{NR1}} P_{i,t}^{1-\sigma_{NR1}} \right)^{\frac{1}{1-\sigma_{NR1}}}, \quad P_{NR2,t} = \left(\sum_{i=k+n1+1}^n a_{i,t}^{\sigma_{NR2}} P_{i,t}^{1-\sigma_{NR2}} \right)^{\frac{1}{1-\sigma_{NR2}}}$$

Si une branche est absente, les équations correspondantes sont supprimées.

- Niveau 1 :

$$\frac{\Omega_{k+1,t}}{\Omega_{1,t}} = \left(\frac{a_{NR,t} P_{R,t}}{a_{R,t} P_{NR,t}} \right)^{\sigma} \left(\frac{a_{NR1,t} P_{NR,t}}{P_{NR1,t}} \right)^{\sigma_{NR}} \left(\frac{a_{R1,t} P_{R,t}}{P_{R1,t}} \right)^{-\sigma_R} \left(\frac{a_{k+1,t} P_{NR1,t}}{P_{k+1,t}} \right)^{\sigma_{NR1}} \left(\frac{a_{1,t} P_{R1,t}}{P_{1,t}} \right)^{-\sigma_{R1}}$$

$$P_{R,t} = \left(\sum_{i=1}^2 a_{Ri,t}^{\sigma_R} P_{Ri,t}^{1-\sigma_R} \right)^{\frac{1}{1-\sigma_R}}, \quad P_{NR,t} = \left(\sum_{i=1}^2 a_{NRi,t}^{\sigma_{NR}} P_{NRi,t}^{1-\sigma_{NR}} \right)^{\frac{1}{1-\sigma_{NR}}}$$

- Bouclage :

$$1 = \sum_{i=1}^n \Omega_{i,t}$$

Remarque : les élasticités de substitution entre énergies de sous-groupes différents sont endogènes. À noter : il y a $\frac{n(n-1)}{2}$ élasticités, et on peut ici en calibrer directement $(n-1)$, les $\frac{(n-2)(n-1)}{2}$ autres élasticités sont endogènes.

Les endogènes sont : $\{\Omega_i\}$.

c) Équations des modèles pour le calcul des cales

De nouveau, les énergies 1, $k1+1$, $k+1$, et $k+n1+1$ servent de référence. En utilisant les fonctions de demande, on peut écrire :

- Niveau 3 :

$$\begin{aligned} \frac{a_{i,t}}{a_{1,t}} &= \left(\frac{\Omega_{i,t}}{\Omega_{1,t}} \right)^{\frac{1}{\sigma_{R1}}} \frac{P_{i,t}}{P_{1,t}}, i \in \llbracket 2 ; k1 \rrbracket \\ \frac{a_{i,t}}{a_{k1+1,t}} &= \left(\frac{\Omega_{i,t}}{\Omega_{k1+1,t}} \right)^{\frac{1}{\sigma_{R2}}} \frac{P_{i,t}}{P_{k1+1,t}}, i \in \llbracket k1 + 1 ; k \rrbracket \\ \frac{a_{i,t}}{a_{k+1,t}} &= \left(\frac{\Omega_{i,t}}{\Omega_{k+1,t}} \right)^{\frac{1}{\sigma_{NR1}}} \frac{P_{i,t}}{P_{k+1,t}}, i \in \llbracket k + 1 ; k + n1 \rrbracket \\ \frac{a_{i,t}}{a_{k+n1+1,t}} &= \left(\frac{\Omega_{i,t}}{\Omega_{k+n1+1,t}} \right)^{\frac{1}{\sigma_{NR2}}} \frac{P_{i,t}}{P_{k+n1+1,t}}, i \in \llbracket k + n1 + 1 ; n \rrbracket \\ 1 &= \sum_{i=1}^{k1} a_{i,t}, 1 = \sum_{i=k1+1}^k a_{i,t}, 1 = \sum_{i=k+1}^{k+n1+1} a_{i,t}, 1, \sum_{i=k+n1+2}^n a_{i,t} = 1 \end{aligned}$$

- Niveau 2 :

$$\begin{aligned} \frac{a_{R1,t}}{a_{R2,t}} &= \left(\frac{\Omega_{1,t}}{\Omega_{k1+1,t}} \right)^{\frac{1}{\sigma_R}} \frac{P_{R1,t}}{P_{R2,t}} \left(\frac{a_{k1+1,t} P_{R2,t}}{P_{k1+1,t}} \right)^{\frac{\sigma_{R2}}{\sigma_R}} \left(\frac{a_{1,t} P_{R1,t}}{P_{1,t}} \right)^{\frac{-\sigma_{R1}}{\sigma_R}} \\ \frac{a_{NR1,t}}{a_{NR2,t}} &= \left(\frac{\Omega_{k+1,t}}{\Omega_{k+n1+2,t}} \right)^{\frac{1}{\sigma_{NR}}} \frac{P_{NR1,t}}{P_{NR2,t}} \left(\frac{a_{k+n1+2,t} P_{NR2,t}}{P_{k+n1+2,t}} \right)^{\frac{\sigma_{NR2}}{\sigma_{NR}}} \left(\frac{a_{k+1,t} P_{NR1,t}}{P_{k+1,t}} \right)^{\frac{-\sigma_{NR1}}{\sigma_{NR}}} \\ P_{R1,t} &= \left(\sum_{i=1}^{k1} a_{i,t}^{\sigma_{R1}} P_{i,t}^{1-\sigma_{R1}} \right)^{\frac{1}{1-\sigma_{R1}}}, \quad P_{R2,t} = \left(\sum_{i=k1+1}^k a_{i,t}^{\sigma_{R2}} P_{i,t}^{1-\sigma_{R2}} \right)^{\frac{1}{1-\sigma_{R2}}} \\ P_{NR1,t} &= \left(\sum_{i=k+1}^{k+n1+1} a_{i,t}^{\sigma_{NR1}} P_{i,t}^{1-\sigma_{NR1}} \right)^{\frac{1}{1-\sigma_{NR1}}}, \quad P_{NR2,t} = \left(\sum_{i=k+n1+2}^n a_{i,t}^{\sigma_{NR2}} P_{i,t}^{1-\sigma_{NR2}} \right)^{\frac{1}{1-\sigma_{NR2}}} \\ a_{R1,t} + a_{R2,t} &= 1, a_{NR1,t} + a_{NR2,t} = 1 \end{aligned}$$

- Niveau 3 :

$$\begin{aligned} \frac{a_{R,t}}{a_{NR,t}} &= \left(\frac{\Omega_{1,t}}{\Omega_{k+1,t}} \right)^{\frac{1}{\sigma}} \frac{P_{R,t}}{P_{NR,t}} \left(a_{NR1,t} \frac{P_{NR,t}}{P_{NR1,t}} \right)^{\frac{\sigma_{NR}}{\sigma}} \left(a_{R1,t} \frac{P_{R,t}}{P_{R1,t}} \right)^{\frac{-\sigma_R}{\sigma}} \left(\frac{a_{k+1,t} P_{NR1,t}}{P_{k+1,t}} \right)^{\frac{\sigma_{NR1}}{\sigma}} \left(\frac{a_{1,t} P_{R1,t}}{P_{1,t}} \right)^{\frac{-\sigma_{R1}}{\sigma}} \\ P_{R,t} &= \left(\sum_{i=1}^2 a_{Ri,t}^{\sigma_R} P_{Ri,t}^{1-\sigma_R} \right)^{\frac{1}{1-\sigma_R}}, \quad P_{NR,t} = \left(\sum_{i=1}^2 a_{NRi,t}^{\sigma_{NR}} P_{NRi,t}^{1-\sigma_{NR}} \right)^{\frac{1}{1-\sigma_{NR}}} \end{aligned}$$

Les cales des différents niveaux sont les variables endogènes.

d) Impact d'un choc sur les prix de l'énergie

L'énergie 1 sert de référence. On suppose que toutes les cales sont constantes, sans perte de généralité. La log-linéarisation des fonctions de demande donne :

$$d \log \Omega_{i,t} = d \log \Omega_{1,t} - \sigma_{R1} (d \log P_{i,t} - d \log P_{1,t}) \text{ si } i \in \llbracket 2 ; k1 \rrbracket$$

$$d \log \Omega_{i,t} = d \log \Omega_{1,t} + \sigma_R (d \log P_{R1,t} - d \log P_{R2,t}) + \sigma_{R2} (d \log P_{R2,t} - d \log P_{i,t}) - \sigma_{R1} (d \log P_{R1,t} - d \log P_{1,t}) \text{ si } i \in \llbracket k1 + 1 ; k \rrbracket$$

$$d \log \Omega_{i,t} = d \log \Omega_{1,t} + \sigma (d \log P_{R,t} - d \log P_{NR,t}) + \sigma_{NR} (d \log P_{NR,t} - d \log P_{NR1,t}) - \sigma_R (d \log P_{R,t} - d \log P_{R1,t}) + \sigma_{NR1} (d \log P_{NR1,t} - d \log P_{i,t}) - \sigma_{R1} (d \log P_{R1,t} - d \log P_{1,t}) \text{ si } i \in \llbracket k + 1 ; k + n1 \rrbracket$$

$$d \log \Omega_{i,t} = d \log \Omega_{1,t} + \sigma (d \log P_{R,t} - d \log P_{NR,t}) + \sigma_{NR} (d \log P_{NR,t} - d \log P_{NR2,t}) - \sigma_R (d \log P_{R,t} - d \log P_{R1,t}) + \sigma_{NR2} (d \log P_{NR2,t} - d \log P_{i,t}) - \sigma_{R1} (d \log P_{R1,t} - d \log P_{1,t}) \text{ si } i \in \llbracket k + n1 + 1 ; n \rrbracket$$

De façon générale, indépendamment de la structure des équations de demande, on a, à partir des différents indices de prix :

$$d \log P_{k,t} = \sum_i \varphi_i^k d \log P_{i,t}$$

Où φ_i^k est la part de i dans k en valeur : $\varphi_i^k \equiv \frac{P_i}{P_k}$; à noter : $\varphi_h^k \varphi_j^h = \varphi_j^k$.

De plus, on a :

$$\sum_{i=1}^n \Omega_i d \log \Omega_{i,t} = 0$$

De sorte que :

$$\begin{aligned} d \log \Omega_{1,t} &= \sum_{i=2}^{k1} \Omega_i \sigma_{R1} (d \log P_{i,t} - d \log P_{1,t}) \\ &- \sum_{i=k1+1}^k \Omega_i [\sigma_R (d \log P_{R1,t} - d \log P_{R2,t}) + \sigma_{R2} (d \log P_{R2,t} - d \log P_{i,t}) \\ &\quad - \sigma_{R1} (d \log P_{R1,t} - d \log P_{1,t})] \\ &- \sum_{i=k+1}^{k+n1} \Omega_i [\sigma (d \log P_{R,t} - d \log P_{NR,t}) + \sigma_{NR} (d \log P_{NR,t} - d \log P_{NR1,t}) \\ &\quad - \sigma_R (d \log P_{R,t} - d \log P_{R1,t}) + \sigma_{NR1} (d \log P_{NR1,t} - d \log P_{i,t}) \\ &\quad - \sigma_{R1} (d \log P_{R1,t} - d \log P_{1,t})] \\ &- \sum_{i=k+n1+1}^n \Omega_i [\sigma (d \log P_{R,t} - d \log P_{NR,t}) + \sigma_{NR} (d \log P_{NR,t} - d \log P_{NR2,t}) \\ &\quad - \sigma_R (d \log P_{R,t} - d \log P_{R1,t}) + \sigma_{NR2} (d \log P_{NR2,t} - d \log P_{i,t}) \\ &\quad - \sigma_{R1} (d \log P_{R1,t} - d \log P_{1,t})] \end{aligned}$$

- Soit un choc sur un prix sur l'énergie 1 :

On peut vérifier que :

$$\gamma_{1j} = \begin{cases} -(1 - \Omega_1)\sigma_{R1} - \Delta_{R1}\varphi_j^{R1}(1 - \Omega_{R1}) - \Delta_R\varphi_j^R(1 - \Omega_R) & si\ j = 1 \\ \Omega_{R1}\sigma_{R1} - \Delta_{R1}\varphi_j^{R1}(1 - \Omega_{R1}) - \Delta_R\varphi_j^R(1 - \Omega_R) & si\ j \in \llbracket 2 ; k1 \rrbracket \\ -(1 - \Omega_R)\Delta_R\varphi_j^R + \Omega_{R2}(\Delta_{R2}\varphi_j^{R2} + \sigma_{R2}) & si\ j \in \llbracket k1 + 1 ; k \rrbracket \\ (1 - \Omega_R)\Delta_{NR}\varphi_j^{NR} + \Omega_{NR1}(\Delta_{NR1}\varphi_j^{NR1} + \sigma_{NR1}) & si\ j \in \llbracket k + 1 ; k + n1 \rrbracket \\ (1 - \Omega_R)\Delta_{NR}\varphi_j^{NR} + \Omega_{NR2}(\Delta_{NR2}\varphi_j^{NR2} + \sigma_{NR2}) & si\ j \in \llbracket k + n1 + 1 ; n \rrbracket \end{cases}$$

Où $\Delta_{hi} \equiv (\sigma_h - \sigma_{hi})$, $h \in \{N, R\}$, $i \in \{1, 2\}$ et $\Delta_h \equiv (\sigma - \sigma_h)$, $h \in \{N, R\}$.

- Soit un choc sur un prix d'une énergie de R1 hors énergie 1 :

$$\gamma_{ij} = \begin{cases} \gamma_{1j} + \sigma_{R1} & si\ j = 1 \\ \gamma_{1j} - \sigma_{R1} & si\ j = i \\ \gamma_{1j} & si\ j \in \llbracket 2 ; n \rrbracket, j \neq i\ et\ j \neq 1 \end{cases}$$

Via la même démarche :

- Soit un choc sur une énergie de R2 :

$$\gamma_{ij} = \begin{cases} \gamma_{1j} + \Delta_{R1}\varphi_j^{R1} + \sigma_{R1} & si\ j = 1 \\ \gamma_{1j} + \Delta_{R1}\varphi_j^{R1} & si\ j \in \llbracket 2 ; k1 \rrbracket, j \neq i \\ \gamma_{1j} - \Delta_{R2}\varphi_j^{R2} - \sigma_{R2} & si\ j = i \\ \gamma_{1j} - \Delta_{R2}\varphi_j^{R2} & si\ j \in \llbracket k1 + 1 ; k \rrbracket \\ \gamma_{1j} & si\ j \in \llbracket k + 1 ; n \rrbracket \end{cases}$$

- Soit un choc sur une énergie de NR1 :

$$\gamma_{ij} = \begin{cases} \gamma_{1j} + \Delta_R\varphi_j^R + \Delta_{R1}\varphi_j^{R1} + \sigma_{R1} & si\ j = 1 \\ \gamma_{1j} + \Delta_R\varphi_j^R + \Delta_{R1}\varphi_j^{R1} & si\ j \in \llbracket 2 ; k1 \rrbracket \\ \gamma_{1j} + \Delta_R\varphi_j^R & si\ j \in \llbracket k1 + 1 ; k \rrbracket \\ \gamma_{1j} - \Delta_{NR}\varphi_j^{NR} - \Delta_{NR1}\varphi_j^{NR1} - \sigma_{NR1} & si\ j = i \\ \gamma_{1j} - \Delta_{NR}\varphi_j^{NR} - \Delta_{NR1}\varphi_j^{NR1} & si\ j \in \llbracket k + 1 ; k + n1 \rrbracket, j \neq i \\ \gamma_{1j} - \Delta_{NR}\varphi_j^{NR} & si\ j \in \llbracket k + n1 + 1 ; n \rrbracket \end{cases}$$

- Soit un choc sur une énergie de NR2 :

$$\gamma_{ij} = \begin{cases} \gamma_{1j} + \Delta_R\varphi_j^R + \Delta_{R1}\varphi_j^{R1} + \sigma_{R1} & si\ j = 1 \\ \gamma_{1j} + \Delta_R\varphi_j^R + \Delta_{R1}\varphi_j^{R1} & si\ j \in \llbracket 2 ; k1 \rrbracket \\ \gamma_{1j} + \Delta_R\varphi_j^R & si\ j \in \llbracket k1 + 1 ; k \rrbracket \\ \gamma_{1j} - \Delta_{NR}\varphi_j^{NR} & si\ j \in \llbracket k + 1 ; k + n1 \rrbracket \\ \gamma_{1j} - \Delta_{NR}\varphi_j^{NR} - \Delta_{NR2}\varphi_j^{NR2} - \sigma_{NR2} & si\ j = i \\ \gamma_{1j} - \Delta_{NR}\varphi_j^{NR} - \Delta_{NR2}\varphi_j^{NR2} & si\ j \in \llbracket k + n1 + 1 ; n \rrbracket, j \neq i \end{cases}$$

On peut vérifier que les élasticités de substitution entre énergies n'appartenant pas au même sous-groupe ne sont pas constantes. En effet :

- Si les deux énergies appartiennent au même sous-groupe, alors :

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ha}$$

Avec $h \in \{NR, R\}$ et $a \in \{1,2\}$ l'indice du sous-groupe.

- Si les deux énergies appartiennent au même groupe mais à des sous-groupes différents, alors :

$$\sigma_{ij} = \frac{\sigma_{h1}(d\log P_{h1,t} - d\log P_{i,t}) - \sigma_h(d\log P_{h1,t} - d\log P_{h2,t}) - \sigma_{h2}(d\log P_{h2,t} - d\log P_{j,t})}{d\log P_{j,t} - d\log P_{i,t}}$$

Où $h \in \{NR, R\}$ l'indice du groupe.

- Si les deux énergies appartiennent à des groupes différents, alors :

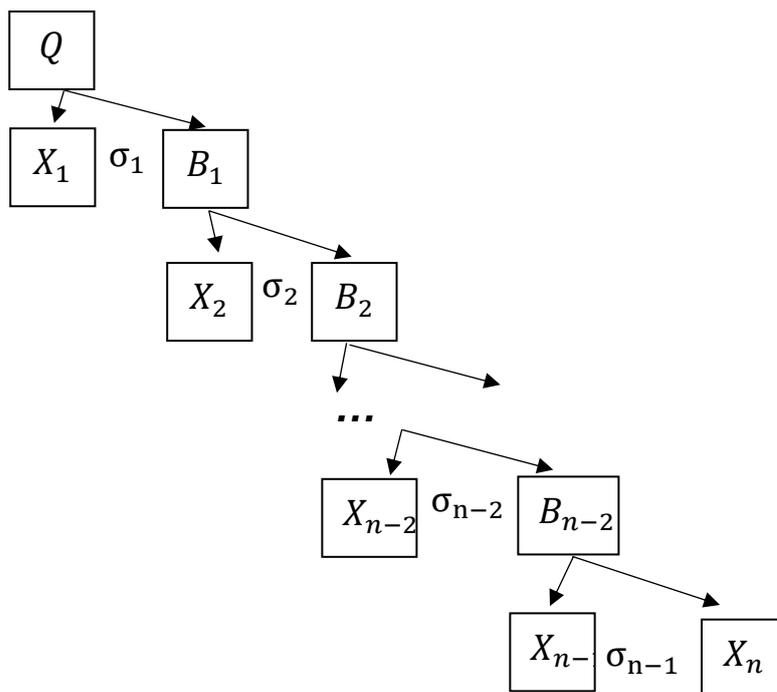
$$\sigma_{ij} = \frac{\sigma_R(d\log P_{R,t} - d\log P_{Ra,t}) - \sigma_{NR}(d\log P_{NR,t} - d\log P_{NRa,t}) + \sigma_{R1}(d\log P_{Ra,t} - d\log P_{i,t})}{d\log P_{j,t} - d\log P_{i,t} - \sigma_{NR1}(d\log P_{NRa,t} - d\log P_{j,t}) - \sigma(d\log P_{R,t} - d\log P_{NR,t})}$$

Avec $a \in \{1,2\}$, l'indice du sous-groupe.

3) CES imbriquée en cascade

a) Représentation graphique de la fonction de production

Il est possible de généraliser la CES imbriquée à n énergies, X_1, \dots, X_n avec $n - 1$ niveaux et $n - 1$ élasticités de substitution $\sigma_1, \dots, \sigma_{n-1}$ par niveau (qui sont donc différentes des élasticités par paire d'énergie).



b) Équations des modèles pour calculer le bouquet

Les équations de production sont les suivantes :

$$Q_t = \left(a_1 X_{1,t}^{\frac{\sigma_1-1}{\sigma_1}} + (1-a_1) B_{1,t}^{\frac{\sigma_1-1}{\sigma_1}} \right)^{\frac{\sigma_1}{\sigma_1-1}}$$

$$B_{1,t} = \left(a_2 X_{2,t}^{\frac{\sigma_2-1}{\sigma_2}} + (1-a_2) B_{2,t}^{\frac{\sigma_2-1}{\sigma_2}} \right)^{\frac{\sigma_2}{\sigma_2-1}}$$

...

$$B_{n-2,t} = \left(a_{n-1} X_{n-1,t}^{\frac{\sigma_{n-1}-1}{\sigma_{n-1}}} + (1-a_{n-1}) X_{n,t}^{\frac{\sigma_{n-1}-1}{\sigma_{n-1}}} \right)^{\frac{\sigma_{n-1}}{\sigma_{n-1}-1}}$$

Les méthodes de résolution usuelles donnent les fonctions de demande suivantes :

$$X_{1,t} = a_1^{\sigma_1} \left(\frac{P_{X_{1,t}}}{P_{Q,t}} \right)^{-\sigma_1} Q_t$$

$$B_{1,t} = (1-a_1)^{\sigma_1} \left(\frac{P_{B_{1,t}}}{P_{Q,t}} \right)^{-\sigma_1} Q_t$$

$$\forall i \in \llbracket 2; n-2 \rrbracket, X_{i,t} = a_i^{\sigma_i} \left(\frac{P_{X_{i,t}}}{P_{B_{i-1,t}}} \right)^{-\sigma_i} B_{i-1,t}$$

$$\forall i \in \llbracket 2; n-2 \rrbracket, B_{i,t} = (1-a_i)^{\sigma_i} \left(\frac{P_{B_{i,t}}}{P_{B_{i-1,t}}} \right)^{-\sigma_i} B_{i-1,t}$$

$$X_{n-1,t} = a_{n-1}^{\sigma_{n-1}} \left(\frac{P_{X_{n-1,t}}}{P_{B_{n-2,t}}} \right)^{-\sigma_{n-1}} B_{n-2,t}$$

$$X_{n,t} = (1-a_{n-1})^{\sigma_{n-1}} \left(\frac{P_{X_{n,t}}}{P_{B_{n-2,t}}} \right)^{-\sigma_{n-1}} B_{n-2,t}$$

Avec les indices de prix agrégés suivants :

$$P_{Q,t} = \left(a_1^{\sigma_1} P_{X_{1,t}}^{1-\sigma_1} + (1-a_1)^{\sigma_1} P_{B_{1,t}}^{1-\sigma_1} \right)^{\frac{1}{1-\sigma_1}}$$

$$\forall i \in \llbracket 1; n-3 \rrbracket, P_{B_{i,t}} = \left(a_i^{\sigma_{i+1}} P_{X_{i+1,t}}^{1-\sigma_{i+1}} + (1-a_{i+1})^{\sigma_{i+1}} P_{B_{i+1,t}}^{1-\sigma_{i+1}} \right)^{\frac{1}{1-\sigma_{i+1}}}$$

$$P_{B_{n-2,t}} = \left(a_i^{\sigma_{n-1}} P_{X_{n-1,t}}^{1-\sigma_{n-1}} + (1-a_{n-1})^{\sigma_{n-1}} P_{X_{n,t}}^{1-\sigma_{n-1}} \right)^{\frac{1}{1-\sigma_{n-1}}}$$

La log-linéarisation des équations de demande donne :

$$\left\{ \begin{array}{l} d \log X_{1,t} = d \log Q_t - \sum_{j=2}^n \sigma_1 \varphi_j (d \log P_{1,t} - d \log P_{j,t}) \\ d \log X_{2,t} = d \log Q_t - \sigma_1 \varphi_1 (d \log P_{2,t} - d \log P_{1,t}) - \sum_{j=3}^n \left(\sigma_1 + \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{1 - \varphi_1} \right) \varphi_j (d \log P_{2,t} - d \log P_{j,t}) \\ \dots \\ d \log X_{n,t} = d \log Q_t - \sigma_1 \varphi_1 (d \log P_{n,t} - d \log P_{1,t}) - \left(\sigma_1 + \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{1 - \varphi_1} \right) \varphi_2 (d \log P_{n,t} - d \log P_{2,t}) - \dots \\ \quad - \left(\sigma_1 + \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{1 - \varphi_1} + \dots + \frac{\sigma_{n-1} - \sigma_{n-2}}{1 - \sum_{i=1}^{n-2} \varphi_i} \right) \varphi_{n-1} (d \log P_{n,t} - d \log P_{n-1,t}) \end{array} \right.$$

Ces équations peuvent être simplement ramenées à la relation suivante :

$$\forall i, d \log X_{i,t} = d \log Q_t - \sum_{j=1}^{i-1} \varphi_j (d \log P_{i,t} - d \log P_{j,t}) \left(\sigma_1 + \sum_{k=2}^j \frac{\sigma_k - \sigma_{k-1}}{1 - \sum_{l=2}^k \varphi_{l-1}} \right) - \sum_{j=i+1}^{n-1} \varphi_j (d \log P_{i,t} - d \log P_{j,t}) \left(\sigma_1 + \sum_{k=2}^i \frac{\sigma_k - \sigma_{k-1}}{1 - \sum_{l=2}^k \varphi_{l-1}} \right)$$

À l'instar de la CES généralisé, une distinction énergies renouvelables/non-renouvelables peut être facilement faite, où le premier niveau est une fonction CES classique des deux types d'énergie, renouvelables et non-renouvelables.

c) Équations des modèles pour le calcul des cales

En utilisant les fonctions de demande, on peut écrire :

$$a_1 = \left(\frac{X_{1,t}}{Q_t} \right)^{\frac{1}{\sigma_1}} \frac{P_{X_{1,t}}}{P_{Q,t}}$$

$$\forall i \in \llbracket 2; n-2 \rrbracket, a_i = \left(\frac{X_{i,t}}{B_{i-1,t}} \right)^{\frac{1}{\sigma_i}} \frac{P_{X_{i,t}}}{P_{B_{i-1,t}}}$$

$$a_{n-1} = \left(\frac{X_{n-1,t}}{B_{n-2,t}} \right)^{\frac{1}{\sigma_{n-1}}} \frac{P_{X_{n-1,t}}}{P_{B_{n-2,t}}}$$

Remarque : À chaque nœud, le modèle impose que la somme des cales est égale à 1.

d) Impact d'un choc sur les prix de l'énergie

En repartant de la fonction de demande log-linéarisée et en supposant les cales constantes, sans perte de généralité, on obtient :

$$\gamma_{ij} = \begin{cases} \varphi_j \left(\sigma_1 + \sum_{k=2}^j \frac{\sigma_k - \sigma_{k-1}}{1 - \sum_{l=2}^k \varphi_{l-1}} \right) & \text{si } j < i \\ - \left[\sum_{j=1}^{i-1} \varphi_j \left(\sigma_1 + \sum_{k=2}^j \frac{\sigma_k - \sigma_{k-1}}{1 - \sum_{l=2}^k \varphi_{l-1}} \right) + \sum_{j=i+1}^n \varphi_j \left(\sigma_1 + \sum_{k=2}^i \frac{\sigma_k - \sigma_{k-1}}{1 - \sum_{l=2}^k \varphi_{l-1}} \right) \right] & \text{si } j = i \\ \varphi_j \left(\sigma_1 + \sum_{k=2}^i \frac{\sigma_k - \sigma_{k-1}}{1 - \sum_{l=2}^k \varphi_{l-1}} \right) & \text{si } j > i \end{cases}$$

L'élasticité de substitution entre deux énergies i et $i - m$ peut s'écrire :

$$\begin{aligned}
 \sigma_{i,i-m} = & \sum_{j=1}^{i-m-1} \varphi_j \left(\sigma_1 + \sum_{k=2}^j \frac{\sigma_k - \sigma_{k-1}}{1 - \sum_{l=2}^k \varphi_{l-1}} \right) \\
 & - \sum_{j=i-m}^{i-1} \varphi_j \frac{d \log P_i - d \log P_j}{d \log P_{i-m} - d \log P_i} \left(\sigma_1 + \sum_{k=2}^j \frac{\sigma_k - \sigma_{k-1}}{1 - \sum_{l=2}^k \varphi_{l-1}} \right) \\
 & - \sum_{j=i-m+1}^i \varphi_j \frac{(d \log P_{i-m} - d \log P_j)}{(d \log P_{i-m} - d \log P_i)} \left(\sigma_1 + \sum_{k=2}^{i-m} \frac{\sigma_k - \sigma_{k-1}}{1 - \sum_{l=2}^k \varphi_{l-1}} \right) \\
 & - \sum_{j=i+1}^{n-1} \frac{\varphi_j}{d \log P_{i-m} - d \log P_i} \left[(d \log P_i - d \log P_j) \left(\sigma_1 + \sum_{k=2}^i \frac{\sigma_k - \sigma_{k-1}}{1 - \sum_{l=2}^k \varphi_{l-1}} \right) \right. \\
 & \left. - (d \log P_{i-m} - d \log P_j) \left(\sigma_1 + \sum_{k=2}^{i-m} \frac{\sigma_k - \sigma_{k-1}}{1 - \sum_{l=2}^k \varphi_{l-1}} \right) \right]
 \end{aligned}$$

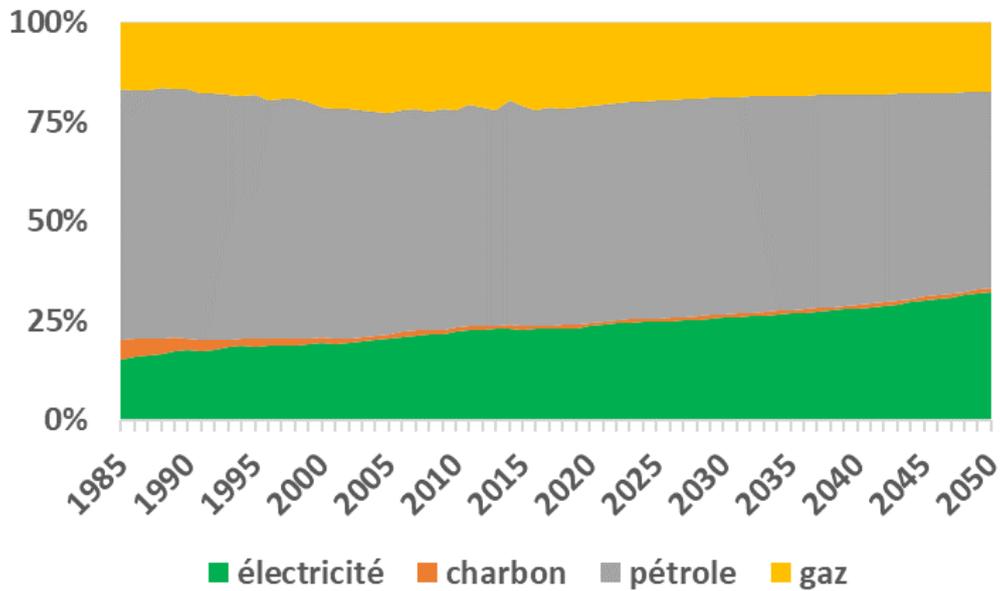
4) Calcul des émissions de carbone

Quelle que soit la forme prise par les équations de demande, on peut ensuite calculer :

$$\text{co2}_t = E_t \sum_{i=i}^n \gamma_{i,t} \Omega_{i,t}$$

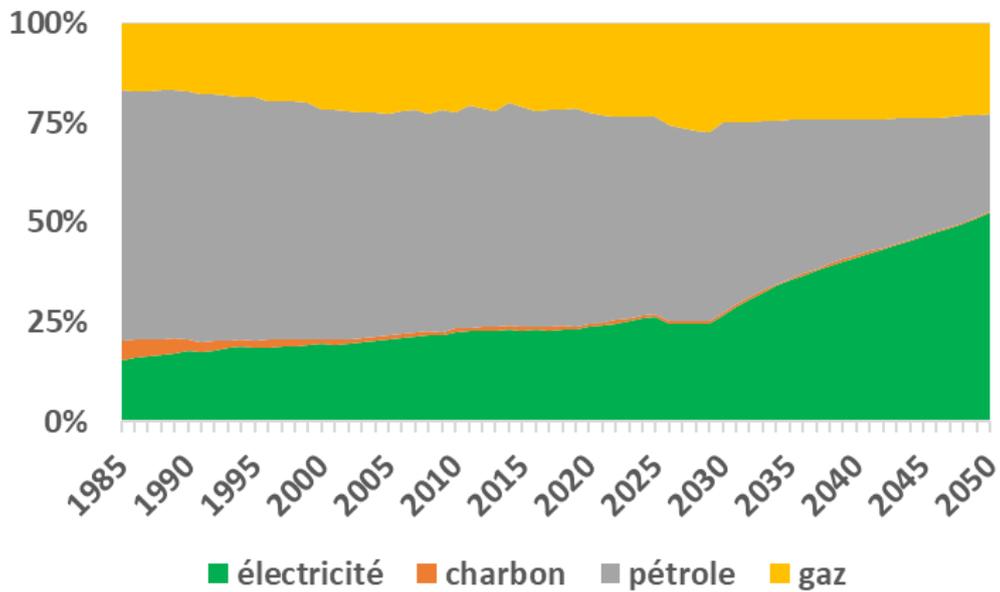
Annexe 3 : Graphiques relatifs à la construction du compte central

Graphique 1 : Part des énergies dans le bouquet énergétique dans le scénario AME



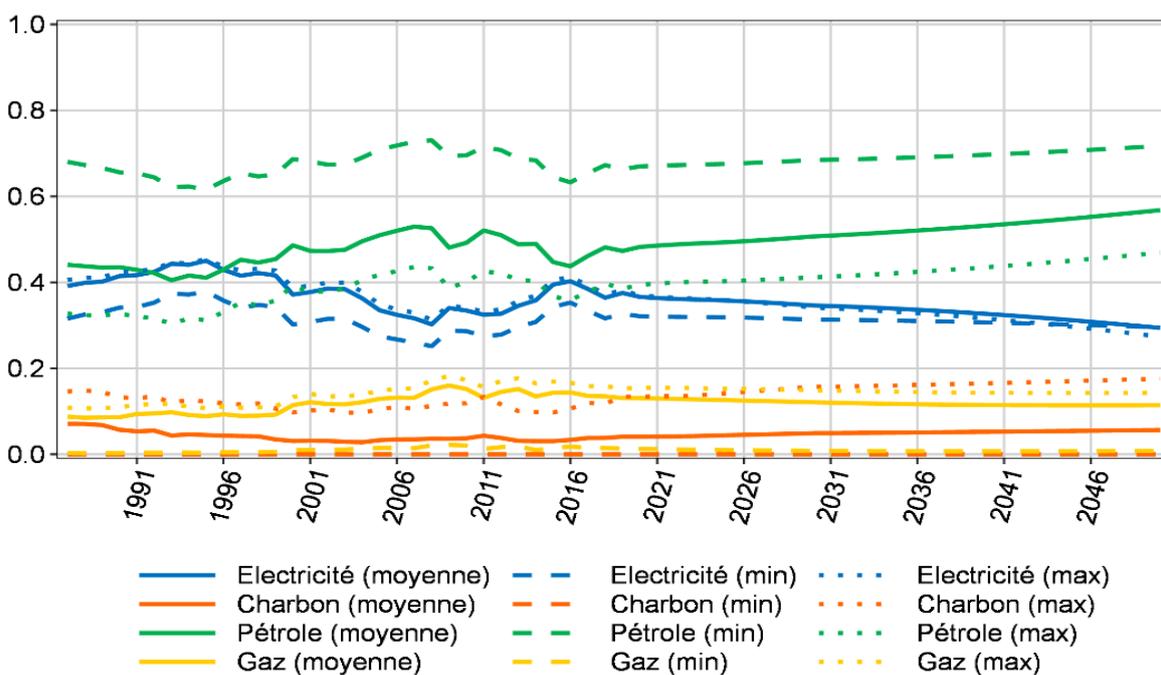
Sources : Ministère de la transition écologique, OCDE, Ademe (ThreeME) ; calculs DG Trésor.

Graphique 2 : Part des énergies dans le bouquet énergétique dans le scénario AMS



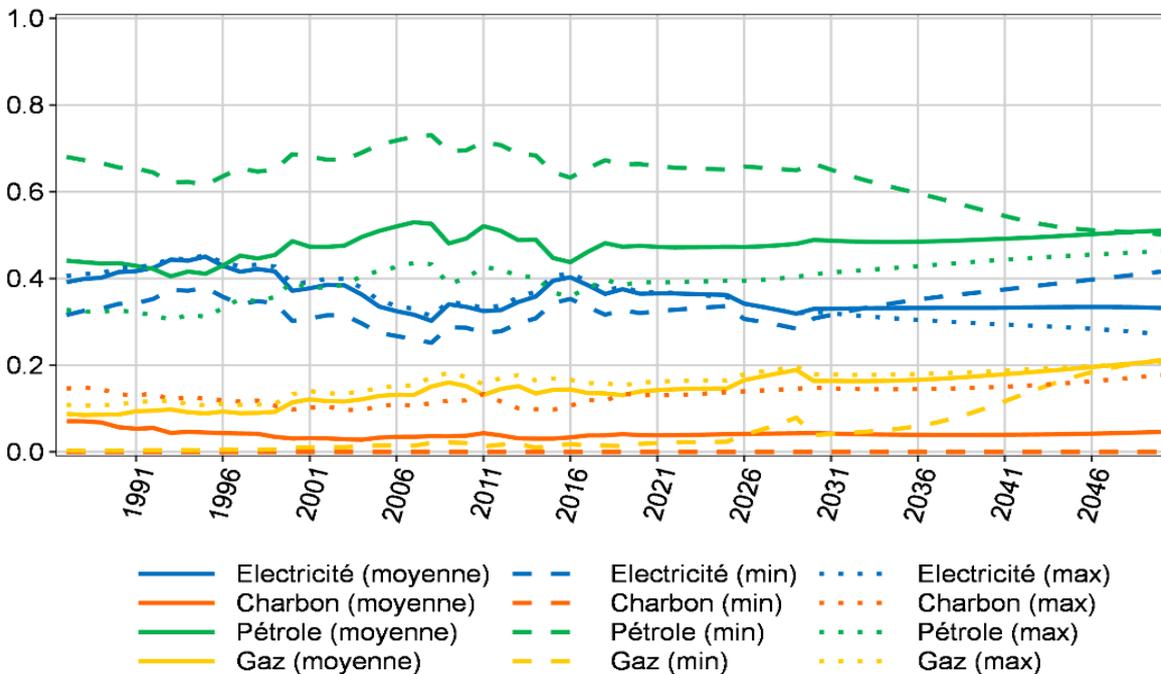
Sources : Ministère de la transition écologique, OCDE, Ademe (ThreeME) ; calculs DG Trésor.

Graphique 3 : Évolution des cales par énergies et élasticité pour le scénario AME



Source : Mésange vert ; calculs DG Trésor.

Graphique 4 : Évolution des cales par énergies et élasticité pour le scénario AMS



Source : Mésange vert ; calculs DG Trésor.

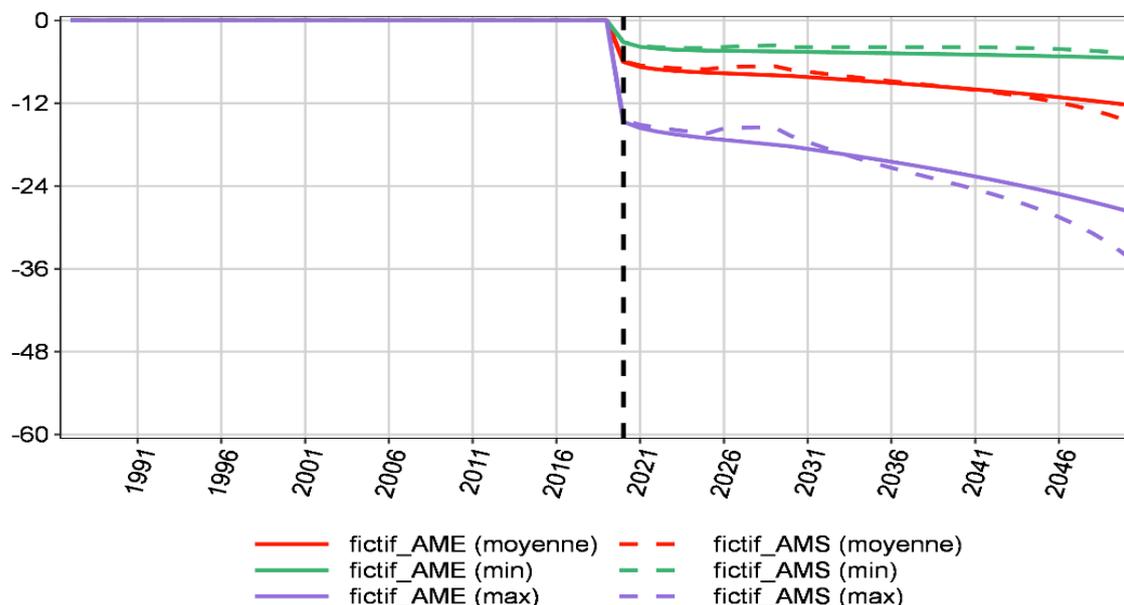
Tableau 1 : Évolution des coefficients d'émission de CO₂, en MtCO₂/tep, par type d'énergie

	Électricité	Charbon	Pétrole	Gaz
1985	0,7	3,3	2,8	2,1
1990	0,7	3,3	2,8	2,1
1995	0,7	3,3	2,8	2,1
2000	0,7	3,3	2,8	2,1
2005	0,7	3,3	2,8	2,1
2010	0,7	3,3	2,8	2,1
2015	0,6	3,3	2,8	2,1
2020	0,5	3,3	2,8	2,1
2025	0,4	3,3	2,8	2,0
2030	0,3	3,3	2,8	1,9
2035	0,2	3,3	2,8	1,4
2040	0,2	3,3	2,8	0,9
2045	0,1	3,3	2,8	0,5
2050	0,0	3,3	2,8	0,0

Source : Ministère de la transition écologique ; calculs DG Trésor.

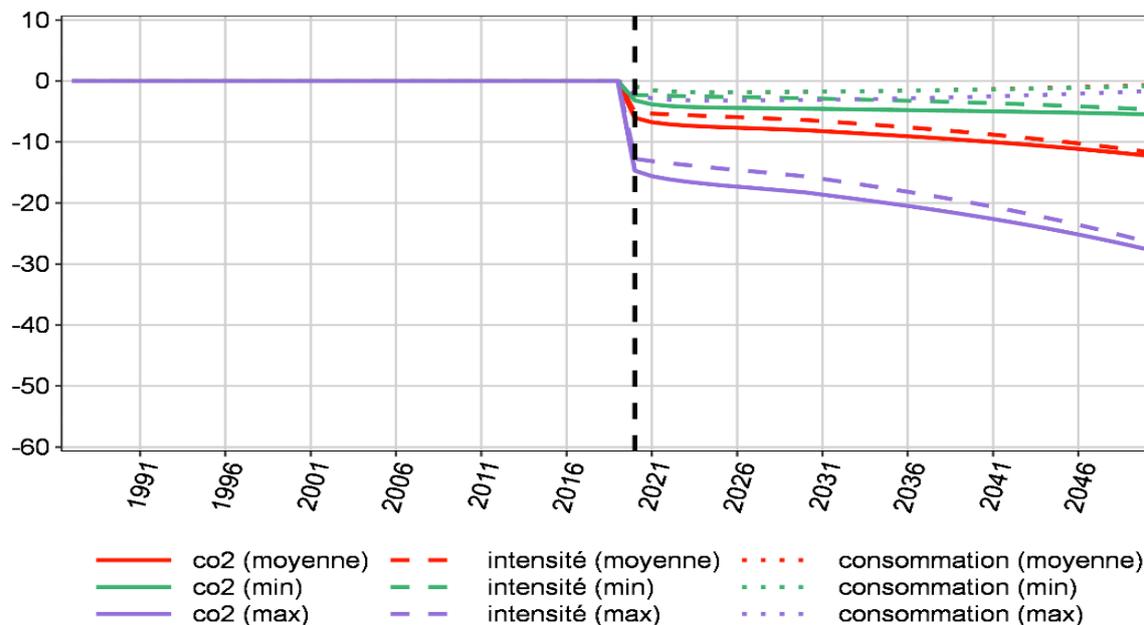
Annexe 4 : Évolution des émissions de CO₂ dans le cas de la variante hausse du prix du baril de pétrole de 10\$

Graphique 1 : Évolution des émissions de CO₂, en MtCO₂ en % en écart au compte central, par élasticité et par scénario (AME et AMS)



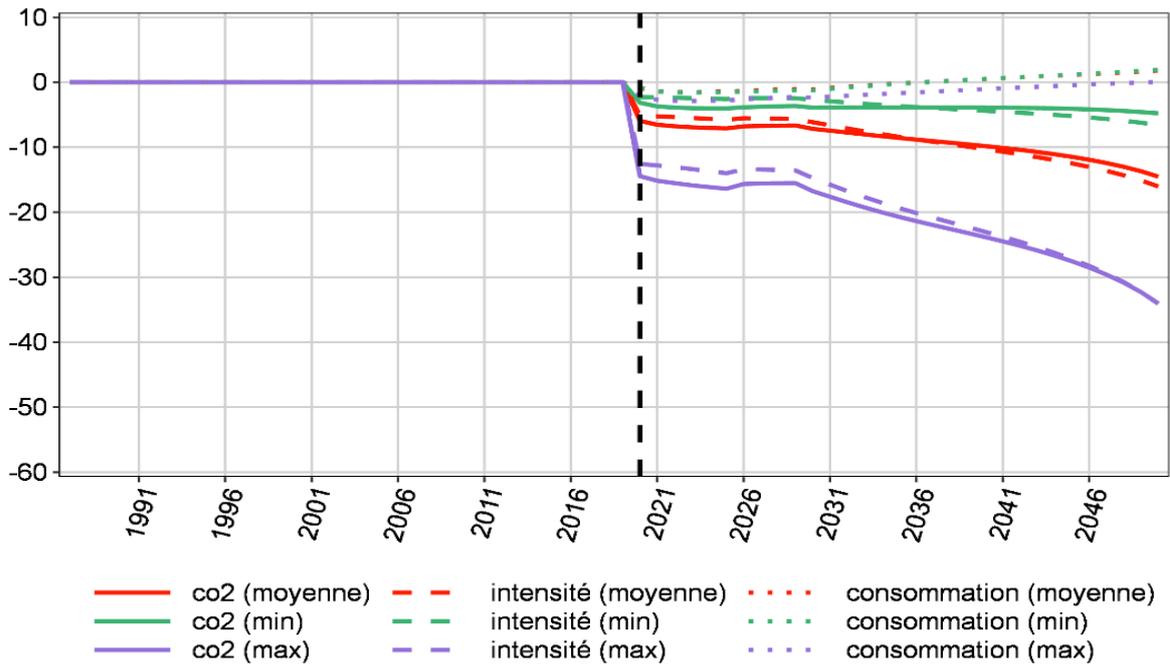
Sources : Ministère de la transition écologique, OCDE, Ademe (ThreeME), Mésange vert ; calculs DG Trésor.

Graphique 2 : Décomposition de l'évolution des émissions de CO₂, entre un effet consommation agrégée et un effet intensité carbone, en MtCO₂ en % en écart au compte central, par élasticité pour le scénario AME



Sources : Ministère de la transition écologique, OCDE, Ademe (ThreeME), Mésange vert ; calculs DG Trésor.

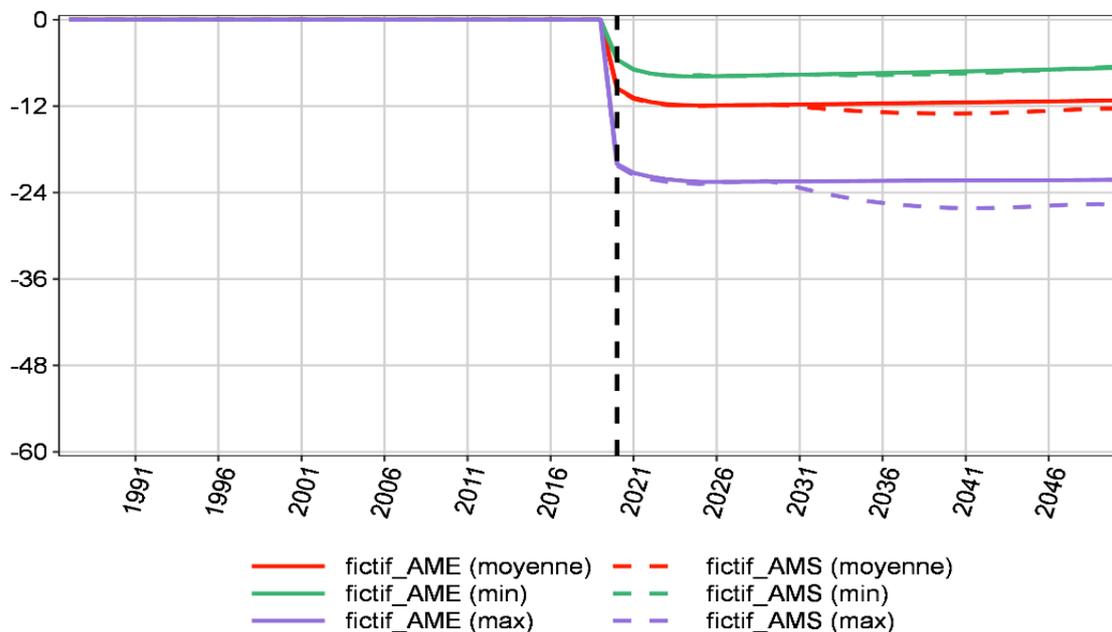
Graphique 3 : Décomposition de l'évolution des émissions de CO₂, entre un effet consommation agrégée et un effet intensité carbone, en MtCO₂ en % en écart au compte central, par élasticité pour le scénario AMS



Sources : Ministère de la transition écologique, OCDE, Ademe (ThreeME), Mésange vert ; calculs DG Trésor.

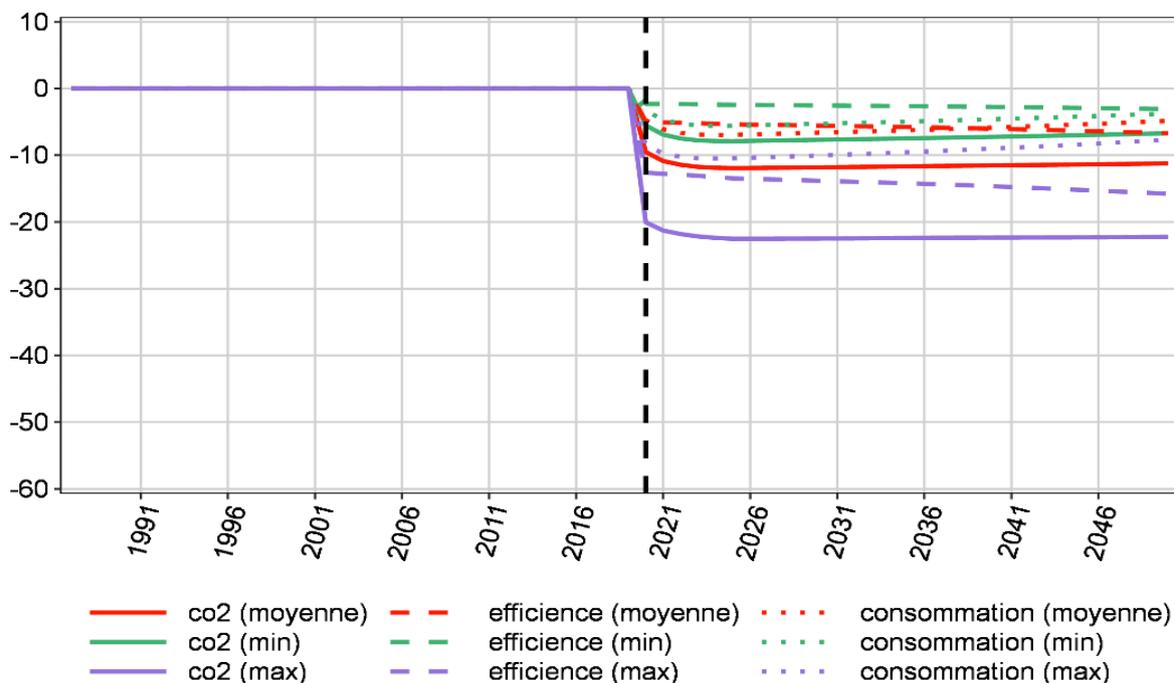
Annexe 5 : Évolution des émissions de CO₂ dans le cas de la variante hausse de la taxe carbone de 1 pt de PIB *ex ante*

Graphique 1 : Évolution des émissions de CO₂, en MtCO₂ en % en écart au compte central, par élasticité et par scénario (AME et AMS)



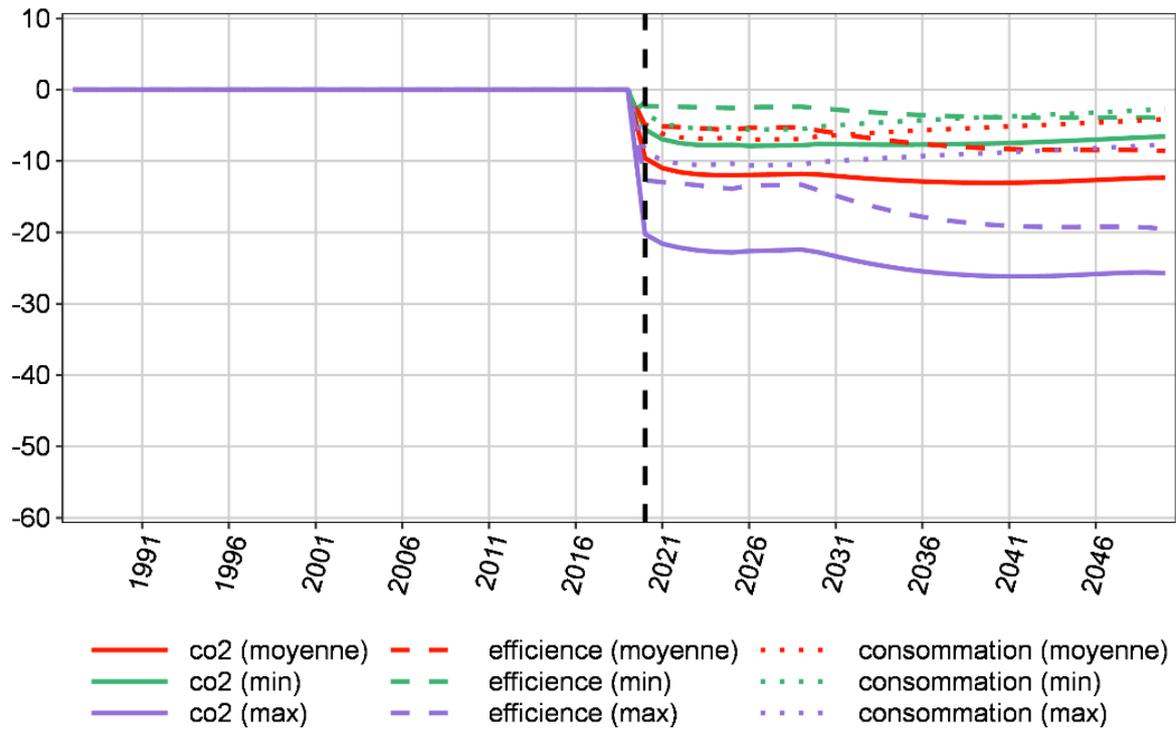
Sources : Ministère de la transition écologique, OCDE, Ademe (ThreeME), Mésange vert ; calculs DG Trésor.

Graphique 2 : Décomposition de l'évolution des émissions de CO₂, entre un effet consommation agrégée et un effet intensité carbone, en MtCO₂ en % en écart au compte central, par élasticité pour le scénario AME



Sources : Ministère de la transition écologique, OCDE, Ademe (ThreeME), Mésange vert ; calculs DG Trésor.

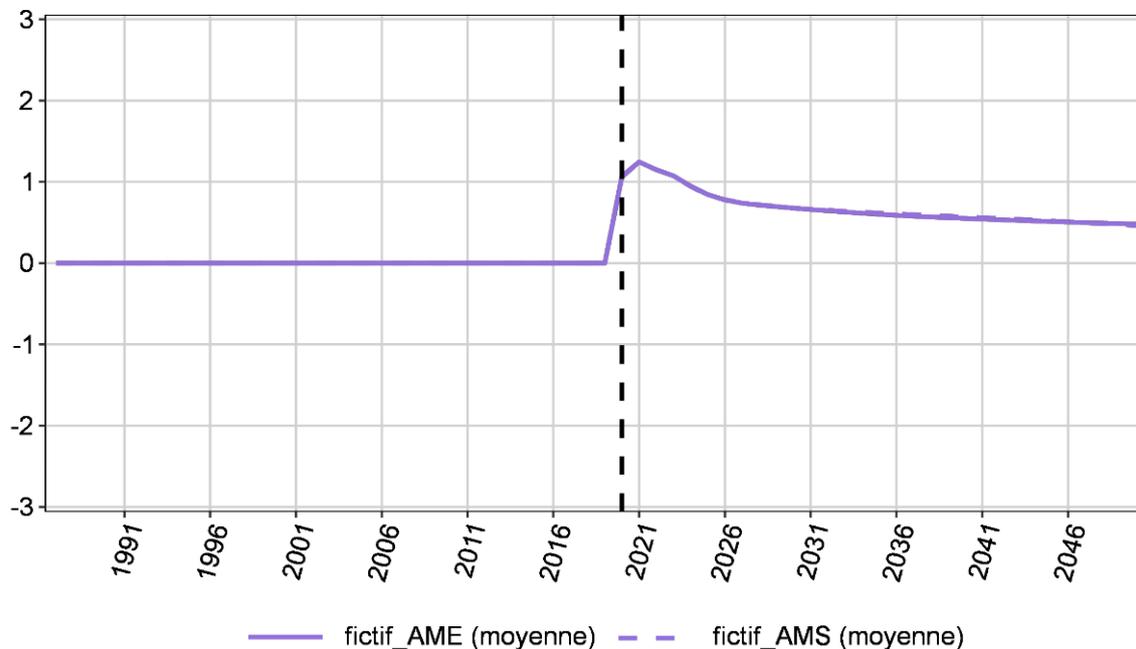
Graphique 3 : Décomposition de l'évolution des émissions de CO₂, entre un effet consommation agrégée et un effet intensité carbone, en MtCO₂ en % en écart au compte central, par élasticité pour le scénario AMS



Sources : Ministère de la transition écologique, OCDE, Ademe (ThreeME), Mésange vert ; calculs DG Trésor.

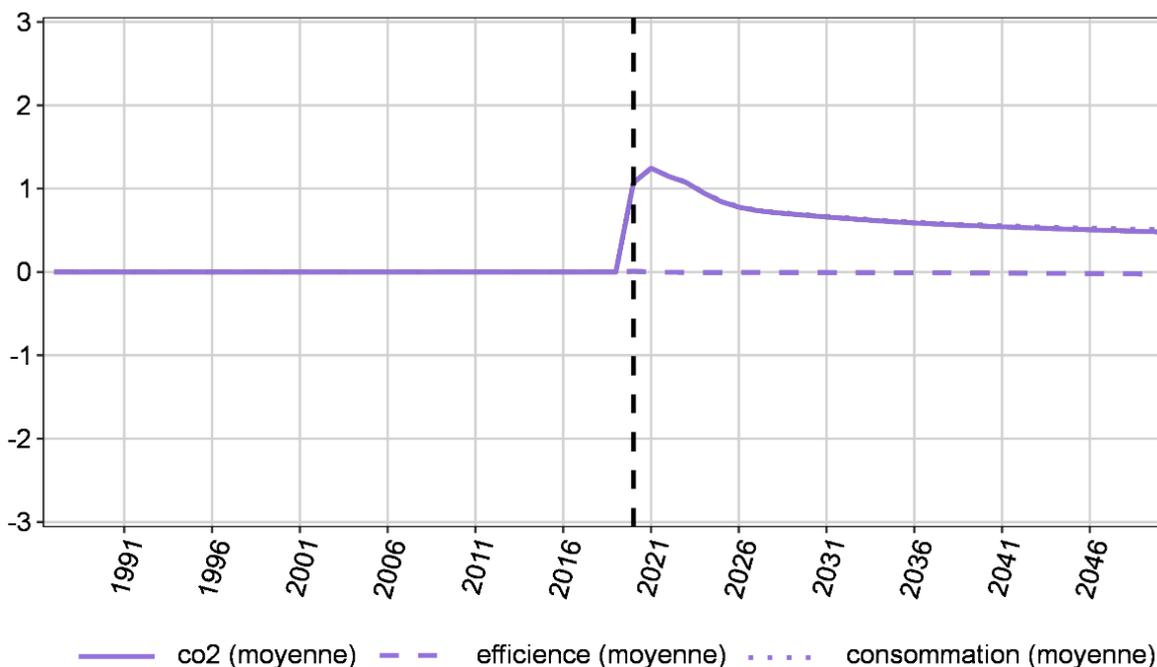
Annexe 6 : Évolution des émissions de CO₂ dans le cas de la variante hausse de l'investissement public de 1 pt de PIB *ex ante*

Graphique 1 : Évolution des émissions de CO₂, en MtCO₂ en % en écart au compte central, par élasticité et par scénario (AME et AMS)



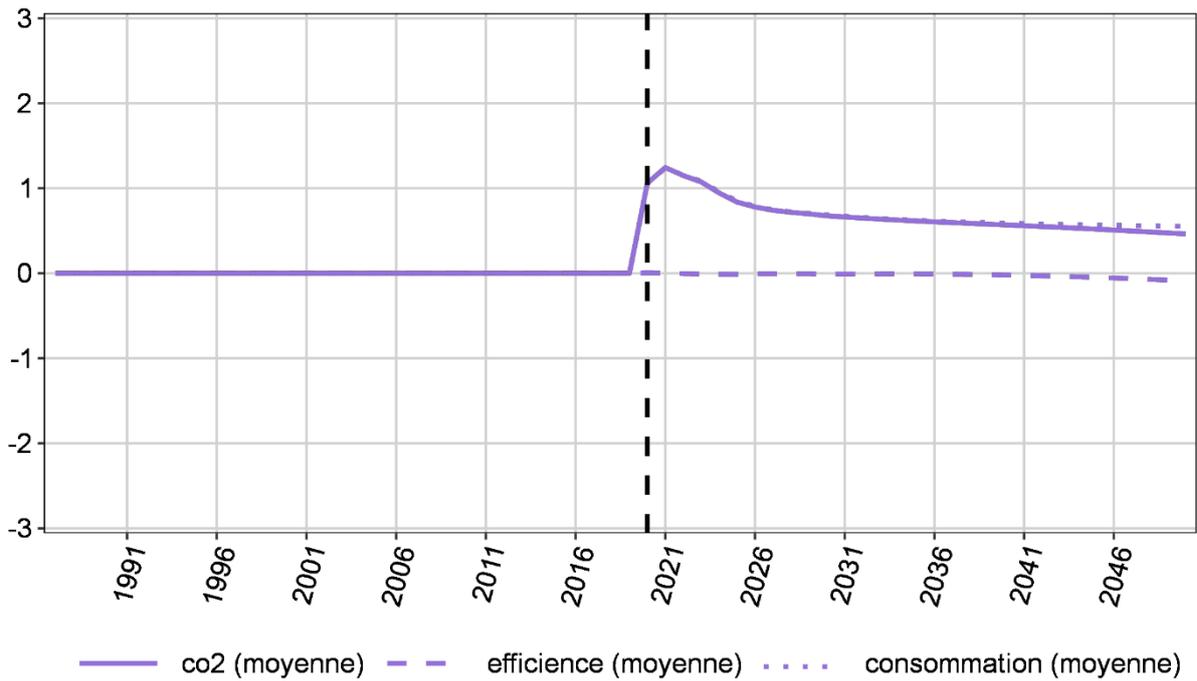
Sources : Ministère de la transition écologique, OCDE, Ademe (ThreeME), Mésange vert ; calculs DG Trésor.

Graphique 2 : Décomposition de l'évolution des émissions de CO₂, entre un effet consommation agrégée et un effet intensité carbone, en MtCO₂ en % en écart au compte central, par élasticité pour le scénario AME



Sources : Ministère de la transition écologique, OCDE, Ademe (ThreeME), Mésange vert ; calculs DG Trésor.

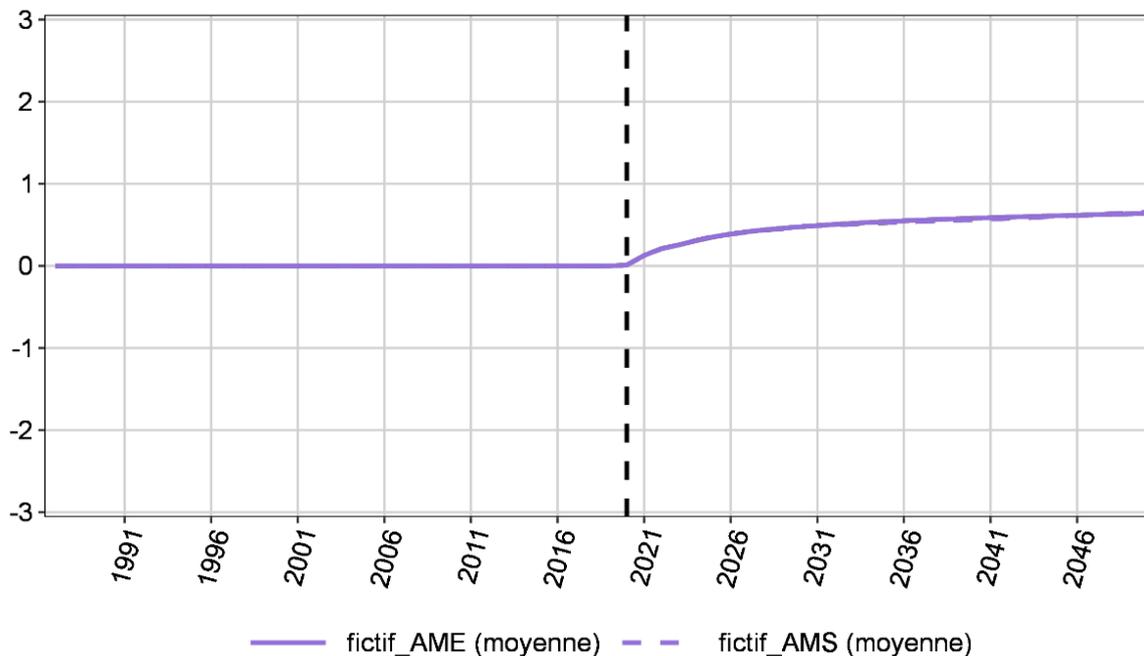
Graphique 3 : Décomposition de l'évolution des émissions de CO₂, entre un effet consommation agrégée et un effet intensité carbone, en MtCO₂ en % en écart au compte central, par élasticité pour le scénario AMS



Sources : Ministère de la transition écologique, OCDE, Ademe (ThreeME), Mésange vert ; calculs DG Trésor.

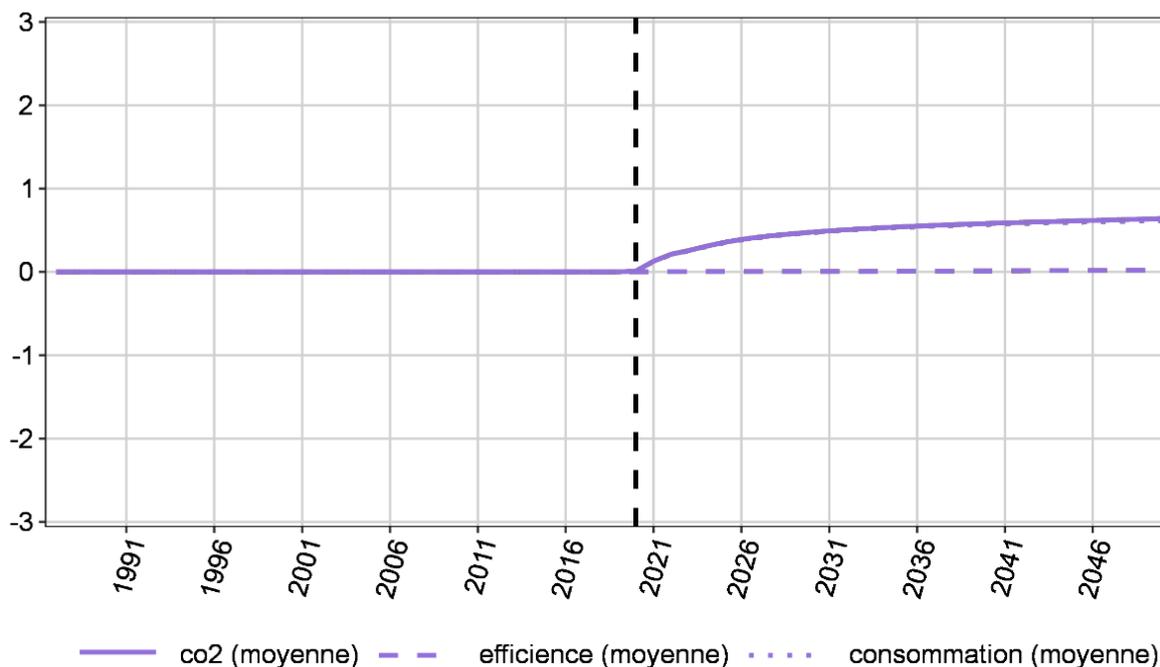
Annexe 7 : Évolution des émissions de CO₂ dans le cas de la variante hausse de l'efficacité de 1 %

Graphique 1 : Évolution des émissions de CO₂, en MtCO₂ en % en écart au compte central, par élasticité et par scénario (AME et AMS)



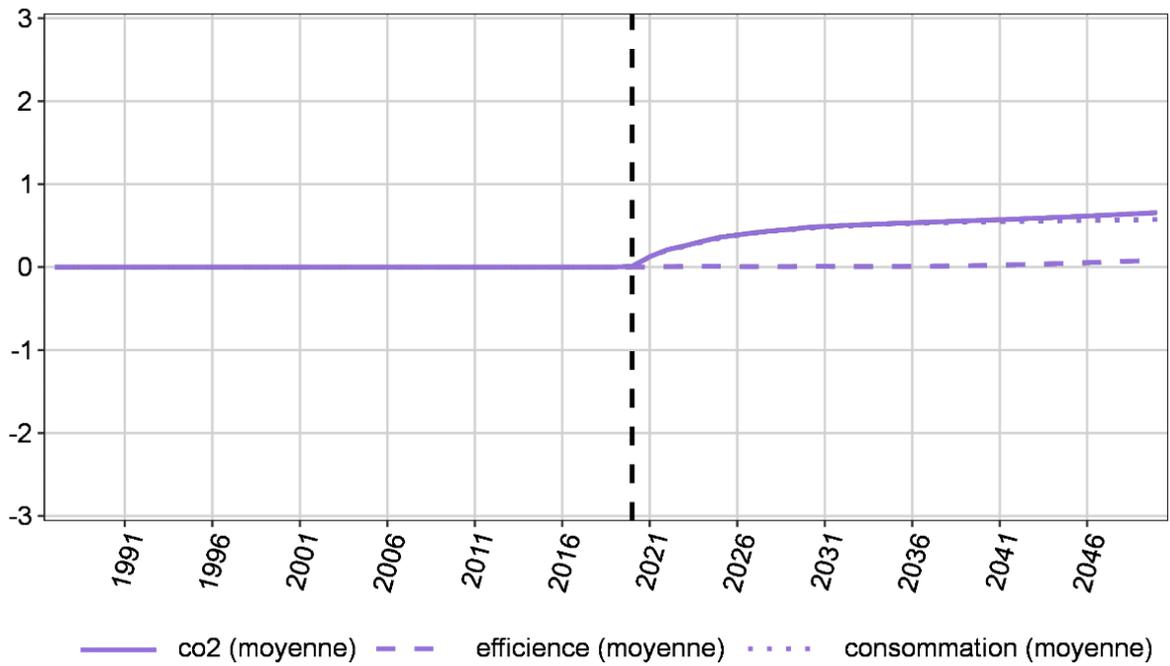
Sources : Ministère de la transition écologique, OCDE, Ademe (ThreeME), Mésange vert ; calculs DG Trésor.

Graphique 2 : Décomposition de l'évolution des émissions de CO₂, entre un effet consommation agrégée et un effet intensité carbone, en MtCO₂ en % en écart au compte central, par élasticité pour le scénario AME



Sources : Ministère de la transition écologique, OCDE, Ademe (ThreeME), Mésange vert ; calculs DG Trésor.

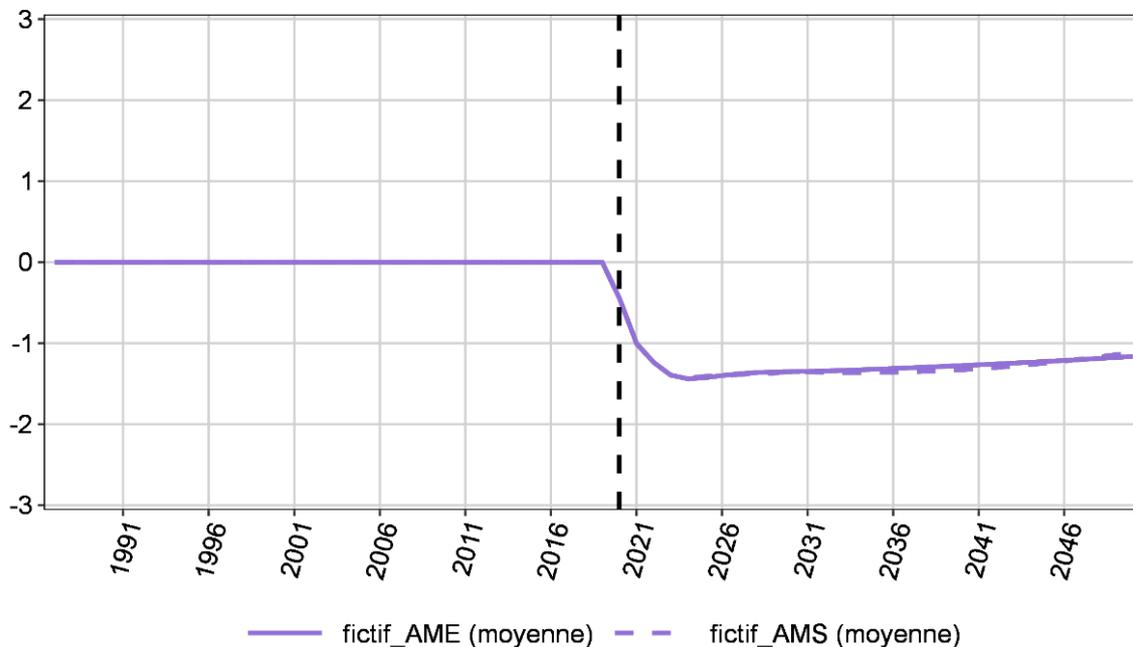
Graphique 3 : Décomposition de l'évolution des émissions de CO₂, entre un effet consommation agrégée et un effet intensité carbone, en MtCO₂ en % en écart au compte central, par élasticité pour le scénario AMS



Sources : Ministère de la transition écologique, OCDE, Ademe (ThreeME), Mésange vert ; calculs DG Trésor.

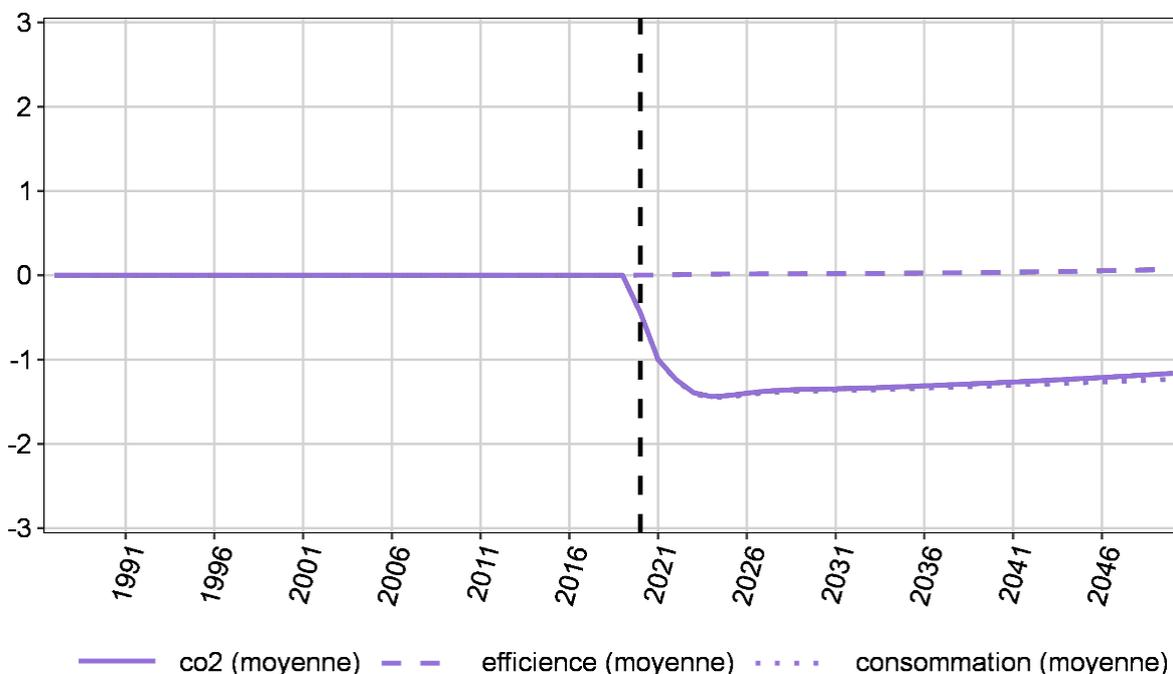
Annexe 8 : Évolution des émissions de CO₂ dans le cas de la variante hausse de la TVA de 1 pt de PIB *ex ante*

Graphique 1 : Évolution des émissions de CO₂, en MtCO₂ en % en écart au compte central, par élasticité et par scénario (AME et AMS)



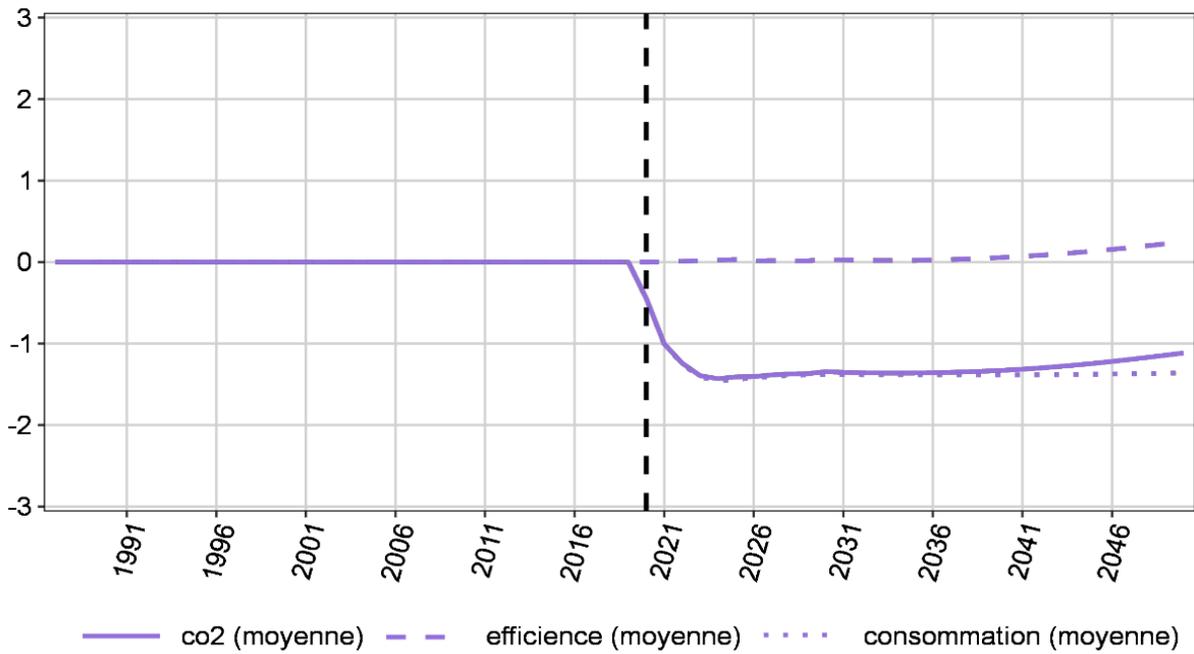
Sources : Ministère de la transition écologique, OCDE, Ademe (ThreeME), Mésange vert ; calculs DG Trésor.

Graphique 2 : Décomposition de l'évolution des émissions de CO₂, entre un effet consommation agrégée et un effet intensité carbone, en MtCO₂ en % en écart au compte central, par élasticité pour le scénario AME



Sources : Ministère de la transition écologique, OCDE, Ademe (ThreeME), Mésange vert ; calculs DG Trésor.

Graphique 3 : Décomposition de l'évolution des émissions de CO₂, entre un effet consommation agrégée et un effet intensité carbone, en MtCO₂ en % en écart au compte central, par élasticité pour le scénario AMS



Sources : Ministère de la transition écologique, OCDE, Ademe (ThreeME), Mésange vert ; calculs DG Trésor.