



C.I.R.E.D.
CENTRE
INTERNATIONAL
DE RECHERCHE
SUR L'ENVIRONNEMENT
ET LE DÉVELOPPEMENT

Le modèle IMACLIM-S

Version 2.3

Frédéric Gherzi
Camille Thubin

29 juin 2009

C.I.R.E.D. UNITÉ MIXTE DE RECHERCHE
EHESS ET CNRS - UMR 8568
JARDIN TROPICAL
45 BIS AVENUE DE LA BELLE GABRIELLE
94736 NOGENT-SUR-MARNE CEDEX - FRANCE
TEL : (33-1) 01 43 94 73 73
FAX : (33-1) 01 43 94 73 70
<http://www.centre-cired.fr>

Le modèle IMACLIM-S est développé au CIREN depuis les années 1990 sous la direction scientifique de Jean-Charles Hourcade.

Dans sa version 2.3 il a grandement bénéficié des travaux de désagrégation des ménages effectués par Emmanuel Combet (Combet, 2007).

Table des matières

Table des matières.....	5
Introduction.....	7
I. Origine et traitement des données de calibrage.....	7
I.1. Cadre comptable : TES et TEE.....	7
I.2. Hybridation des données.....	8
I.3. Désagrégation du ‘ménage représentatif’.....	8
II. Formulaire.....	9
II.1. Prix aux producteurs et aux consommateurs.....	9
II.2. Ménages.....	12
II.2.1. Revenus, choix d’épargne et d’investissement.....	12
II.2.2. Consommation.....	13
II.3. Secteur productif (secteur institutionnel des sociétés).....	14
II.3.1. Revenu disponible brut et choix d’investissement.....	14
II.3.2. Arbitrages dans la production.....	15
II.3.3. Excédent brut d’exploitation.....	17
II.4. Administrations publiques.....	17
II.4.1. Prélèvements obligatoires et option de politique budgétaire.....	17
II.4.2. Revenu disponible brut, dépenses, investissement et transfert.....	18
II.5. ‘Reste du monde’.....	19
II.5.1. Echanges de biens et services.....	19
II.5.2. Flux de capitaux et CAF.....	20
II.6. Equilibres sur les marchés.....	21
II.6.1. Biens et services.....	21
II.6.2. Investissement et flux de capitaux.....	21
II.6.3. Emploi.....	22
III. Hypothèses et calibrage des équations comportementales.....	23
Références bibliographiques.....	25
Notations du modèle.....	27
Variables endogènes.....	27
Paramètres calibrés sur données statistiques.....	30

Paramètres exogènes du modèle 32

Introduction

IMACLIM-S est un modèle d'équilibre général calculable qui a pour objectif de simuler les impacts macroéconomiques de politiques climatiques, dans un cadre équilibré à la fois d'un point de vue comptable (flux économiques) et physique (flux de biens et en particulier bilan énergétique). Deux caractéristiques essentielles le distinguent d'un modèle néoclassique traditionnel : (i) la modélisation d'un déséquilibre sur le marché du travail ; (ii) la modélisation de préférences des ménages et d'arbitrages dans la production spécifiquement pensés pour permettre l'articulation avec une expertise *bottom-up*, dans un souci de garantir le réalisme technique de ses simulations même pour des déviations importantes par rapport à l'équilibre de référence. L'évolution des systèmes techniques résulte également d'un progrès technologique induit.

Les analyses se fondent sur la statique comparative, donc simulent la déformation qu'une économie subit à une date donnée, sous l'impact d'un choc exogène (une politique climatique), après adaptation plus ou moins aboutie (selon les élasticités retenues dans la production et la consommation). Elles sont muettes, en revanche, sur les différentes étapes de la transition.

Ce document de travail propose la description du modèle IMACLIM-S tel qu'il a été mise en œuvre pour le rapport *Economie d'une fiscalité carbone en France* (Hourcade *et al.*, 2009), et plus spécifiquement la version ayant produit les résultats centraux de la section II.1 de ce rapport. Il s'agit d'un modèle appliqué à la France, agrégé en 4 biens (trois biens énergétiques et un bien composite) et 20 classes de ménages. L'outil mathématique est cependant facilement adaptable à des désagrégations différentes—la description des équations reprend d'ailleurs le cas général de nombres n de produits et m de classes de ménages.

I. Origine et traitement des données de calibrage

I.1. Cadre comptable : TES et TEE

Les statistiques de la comptabilité nationale fournissent un cadre d'analyse élargi pour des exercices de simulation macroéconomique. IMACLIM-S utilise les agrégats d'une année donnée issus de deux tableaux de synthèse fournis par l'INSEE :

- le TES (Tableau Entrées-Sorties) représente l'équilibre emplois-ressources de l'économie ;
- le TEE (Tableau Economique d'ensemble) présente les comptes des différents secteurs institutionnels selon une logique de revenu.

Les données brutes du TES sont traitées afin de déboucher sur une description de la production et des consommations dans une logique 'produit × produit', sans constitution de stocks et avec un détail des composantes de la valeur ajoutée des productions. Les étapes sont les suivantes : désagrégation des postes de la valeur ajoutée des branches, passage d'une logique de branche à une logique de produits, correction des variations de stocks et désagrégation des impôts sur produits.

Le TEE est quant à lui ramené à 4 secteurs institutionnels (ménages, sociétés, administrations publiques et ‘reste du monde’), et ses nombreuses entrées simplifiées en quelques masses de transferts, à un niveau d’agrégation comparable à celui du TES. Son exploitation permet en dernier ressort d’étendre le cadre traditionnel de la modélisation en équilibre général à la représentation de la distribution du revenu national entre agents économiques, et à l’évolution des positions financières de ces agents qui en découle.

I.2. Hybridation des données

Etant donné son objet d’analyse IMACLIM-S nécessite un certain réalisme quant à la description des intrants énergétiques dans la production et des consommations énergétiques des ménages. La mise en œuvre de politiques climatiques cible en effet des émissions de gaz à effet de serre qui découlent de la consommation de quantités physiques précises, mal représentées par les quasi-quantités traditionnellement obtenues d’un TES par la normalisation des prix de production de l’ensemble des biens. Un calibrage rigoureux du modèle nécessite donc une comptabilisation exacte des quantités physiques d’énergie consommée, exprimées dans une unité commune, les MTEP.

Pour ce faire les bilans énergétiques de l’AIE sont mis à profit. Il est également possible de réunir d’après diverses sources (AIE, CPDP, *etc.*) les prix d’une MTEP pour chaque type d’énergie utilisée comme consommation intermédiaire ou comme consommation finale. Le croisement du bilan énergétique et des prix différenciés par agent (l’hypothèse de prix unique est abandonnée) produit alors une matrice en valeur des consommations énergétiques. Ces valeurs ne correspondent bien sûr pas à celles du TES pour les produits énergétiques, ce pour un ensemble de raisons (inclusion des services au-delà des consommations brutes, hétérogénéité des produits, méthode d’équilibrage des statistiques, *etc.*). L’hybridation du TES consiste alors à imputer la différence entre les valeurs trouvées dans le TES et les valeurs calculées sur statistiques énergétiques, à l’activité d’un bien non-énergétique—dans le modèle à 4 produits, à celle du bien composite—de sorte que seule la désagrégation par produits du tableau soit modifiée, mais ses totaux conservés.

Le calibrage du modèle sur ce TES modifié débouche donc, d’une part sur des volumes de biens non-énergétiques traditionnellement dérivés de l’hypothèse d’un prix unique, d’autre part, pour les biens énergétiques, sur des volumes et des prix strictement alignés sur les statistiques énergétiques. Les variations de prix du même produit énergétique selon qu’il est consommé par un agent ou un autre (par exemple les tarifications variables du kWh électrique) sont représentées en calibrant des ‘marges spécifiques’ aux différents emplois.

I.3. Désagrégation du ‘ménage représentatif’

La désagrégation du ‘ménage représentatif’ en 20 classes de niveaux de vie est obtenue par l’exploitation de l’enquête *Budget des Familles* 2001 de l’INSEE, et largement documentée in Combet (2007).

II. Formulaire

Modèle de statique comparative, IMACLIM-S se résume à un système d'équations simultanées :

$$\begin{cases} f_1(x_1, \dots, x_n, z_1, \dots, z_m) = 0 \\ f_2(x_1, \dots, x_n, z_1, \dots, z_m) = 0 \\ \dots \\ f_n(x_1, \dots, x_n, z_1, \dots, z_m) = 0 \end{cases}$$

avec :

- $x_i, i \in [1, n]$, un ensemble de variables (autant que d'équations),
- $z_i, i \in [1, m]$, un ensemble de paramètres,
- $f_i, i \in [1, n]$, un ensemble de fonctions, dont certaines sont non linéaires en x_i .

Les f_i regroupent deux types d'équations : d'une part un ensemble d'équations qui assurent l'équilibre comptable du système et sont nécessairement vérifiées ; d'autre part des équations comportementales écrites soit sous une forme simple et linéaire (les ménages par exemple consomment une proportion fixe de leur revenu), soit sous forme de fonctions non-linéaires plus complexes (arbitrages dans la production et la consommation). Le second jeu d'équations renvoie à un ensemble de choix de modélisation dérivant d'une certaine représentation de l'économie et qui s'insère dans l'architecture flexible d'IMACLIM-S.

La présentation des équations aborde successivement (i) la construction comptable de l'ensemble des prix à la consommation, (ii) les équations comptables et de comportement des trois secteurs institutionnels représentés (ménages, sociétés, administrations publiques), (iii) les équations d'équilibre des marchés.

L'indice 0 associé au nom d'une variable endogène désigne la valeur prise par cette variable dans l'équilibre de référence (défini par le TES hybride 2004 et le TEE 2004).

II.1. Prix aux producteurs et aux consommateurs

p_{Yi} le prix à la production domestique du bien i est calculé à partir de la structure de coût pour la production du bien i , définie comme la somme des consommations intermédiaires, du coût du travail, du coût du capital, d'un impôt sur la production, et d'un taux de marge constant calibré à l'année de référence (excédent net d'exploitation) :

$$p_{Yi} = \sum_{j=1}^n p_{Cj} \alpha_{ji} + p_{Li} l_i + p_K k_i + \bar{\tau}_{Yi} p_{Yi} + \bar{\pi}_i p_{Yi} \quad (1)$$

p_{Mi} le prix du bien i importé est supposé invariant—plus précisément, l'un des biens internationaux est utilisé comme numéraire du modèle (dans les simulations du texte il s'agit du bien

composite international) et les prix des autres biens relativement à celui de ce numéraire sont supposés constants.

$$p_{Mi} = p_{Mi0} \quad (2)$$

p_i le prix moyen de la ressource en bien i est la moyenne des deux prix précédents pondérés des quantités :

$$p_i = \frac{p_{Yi} Y_i + p_{Mi} M_i}{Y_i + M_i} \quad (3)$$

Les variétés domestique et internationale des biens énergétiques sont en effet supposées homogènes. L'hypothèse d'une différenciation, retenue dans de nombreux MEGC par le recours à une spécification d'Armington, présenterait le désavantage de créer des biens 'hybrides' dont l'unité de volume serait indépendante de celles des variétés qui les composent, ce qui interdirait de maintenir un compte explicite en MTEP des flux physiques d'énergie, donc un bilan énergétique équilibré. Par simplification les biens non-énergétiques sont traités de manière similaire.

p_{Cij} le prix du bien i consommé par la production de bien j est égal au prix de la ressource en bien i augmenté des marges commerciales, des marges de transport, des marges spécifiques (*cf.* section I.2), de la Taxe Intérieure sur les Produits Pétroliers (TIPP)¹, des autres impôts sur produits et enfin de la taxe sur les émissions de carbone.

$$p_{Cij} = p_i \left(1 + \tau_{MCi} + \tau_{MTi} + \overline{\tau_{MSCij}} \right) + \overline{t_{TIPPci}} + \overline{t_{AIPi}} + t_{CI} \gamma_{Cij} \quad (4)$$

Les prix à la consommation du bien i pour les ménages (p_{Ci}), les administrations publiques (p_{Gi}) et l'investissement (p_{Ii}), ainsi que les prix à l'exportation (p_{Xi}), sont construits de manière similaire et ne diffèrent que selon s'ils supportent la TVA (un taux moyen identique est appliqué à toutes les consommations d'un même bien) et la fiscalité carbone. Cette dernière n'est appliquée qu'aux prix des ménages, qui sont considérés seuls consommateurs finals d'énergie par la comptabilité nationale².

$$p_{Ci} = \left[p_i \left(1 + \tau_{MCi} + \tau_{MTi} + \overline{\tau_{MSCi}} \right) + \overline{t_{TIPPcfi}} + \overline{t_{AIPi}} + t_{CF} \gamma_{CFi} \right] \left(1 + \overline{\tau_{TVai}} \right) \quad (5)$$

$$p_{Gi} = \left[p_i \left(1 + \tau_{MCi} + \tau_{MTi} + \overline{\tau_{MSGi}} \right) + \overline{t_{TIPPcfi}} + \overline{t_{AIPi}} \right] \left(1 + \overline{\tau_{TVai}} \right) \quad (6)$$

$$p_{Ii} = \left[p_i \left(1 + \tau_{MCi} + \tau_{MTi} + \overline{\tau_{MSIi}} \right) + \overline{t_{TIPPcfi}} + \overline{t_{AIPi}} \right] \left(1 + \overline{\tau_{TVai}} \right) \quad (7)$$

$$p_{Xi} = p_i \left(1 + \tau_{MCi} + \tau_{MTi} + \overline{\tau_{MSXi}} \right) + \overline{t_{TIPPcfi}} + \overline{t_{AIPi}} \quad (8)$$

Les marges commerciales τ_{MCi} et sur les transports τ_{MTi} , communes pour chaque bien i à l'ensemble des prix intermédiaires et finals, sont constantes (calibrées à l'équilibre de référence), à l'exception de celles sur les productions englobant les transports et le commerce (ci-après indicées

¹ La TIPP prélevée sur les consommations intermédiaires et finales de carburants et d'autres énergies est différenciée de manière à prendre en compte les mix énergétiques sous-jacents.

² Les administrations publiques ne consomment qu'un 'service public' dont les consommations d'énergie apparaissent dans la production, et sont taxées pour leur contenu carbone à ce niveau.

COM et TRANS), qui sont simplement ajustées, dans l'équilibre dérivé, de sorte que les sommes des deux types de marges soient nulles :

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^n \tau_{MC_{COM}} p_{COM} \alpha_{COMj} Y_j + \tau_{MC_{COM}} p_{COM} (C_{COM} + G_{COM} + I_{COM} + X_{COM}) \\ &= \sum_{i \neq COM} \sum_j \overline{\tau_{MC_i}} p_i \alpha_{ij} Y_j + \sum_{i \neq COM} \overline{\tau_{MC_i}} p_i (C_i + G_i + I_i + X_i) \end{aligned} \quad (9)$$

et de manière similaire

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^n \tau_{MT_{TRANS}} p_{TRANS} \alpha_{TRANSj} Y_j + \tau_{MT_{TRANS}} p_{TRANS} (C_{TRANS} + G_{TRANS} + I_{TRANS} + X_{TRANS}) \\ &= \sum_{i \neq TRANS} \sum_j \overline{\tau_{MT_i}} p_i \alpha_{ij} Y_j + \sum_{i \neq TRANS} \overline{\tau_{MT_i}} p_i (C_i + G_i + I_i + X_i) \end{aligned} \quad (10)$$

Le coût du travail facteur de production est égal aux salaires nets w_i augmentés des cotisations sociales salariales et patronales selon un taux unique τ_{CS} (non différencié par production) :

$$p_{Li} = (1 + \tau_{CS}) w_i \quad (11)$$

Les variations de τ_{CS} sont dictées par le produit fiscal de la taxe carbone (recyclage euro pour euro), ou par la contrainte budgétaire publique (*cf.* équations 48 à 50) tandis que celles de w_i sont posées identiques à celles du salaire moyen w :

$$w_i = \frac{w}{w_0} w_{i0}, \quad (12)$$

w étant défini comme

$$w = \frac{\sum_{i=1}^n w_i l_i Y_i}{\sum_{i=1}^n l_i Y_i}, \quad (13)$$

et variant en fonction des conditions sur le marché de l'emploi (*cf.* Section II.6).

Le coût du capital facteur de production est entendu comme le coût du capital 'machine' (*cf.* les conditions de l'arbitrage dans la production section **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Il est donc obtenu par la moyenne du prix des biens destinés à l'investissement³.

$$p_K = \frac{\sum_{i=1}^n p_{Li} I_i}{\sum_{i=1}^n I_i} \quad (14)$$

³ Dans les modèles où un seul bien composite agrège la totalité des biens non-énergétiques seul ce bien est immobilisé, et p_K se confond donc avec son p_I .

IPC l'indice des prix à la consommation est calculé selon la méthode de Fisher comme la moyenne géométrique des indices de Laspeyres (variation du coût du panier de biens de référence) et de Paasche (variation du coût du panier de biens dérivé).

$$IPC = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n p_{C_i} C_{i0} \sum_{i=1}^n p_{C_i} C_i}{\sum_{i=1}^n p_{C_{i0}} C_{i0} \sum_{i=1}^n p_{C_{i0}} C_i}} \quad (15)$$

II.2. Ménages

La désagrégation des ménages en m classes indicées h , $h \in [1, m]$, vise à prendre en compte des structures de revenu, et à terme des comportements et des capacités d'adaptation qui peuvent varier significativement. Dans l'idéal elle est opérée, plutôt que sur des niveaux de vie en définitive peu représentatifs de la vulnérabilité énergétique⁴, sur des critères plus adaptés à la représentation de l'hétérogénéité réelle des situations.

II.2.1. Revenus, choix d'épargne et d'investissement

$R_{DBA}h$ le revenu primaire brut d'une classe h est défini comme l'addition et la soustraction des termes suivants :

- Une part ω_{Lh} de la somme des revenus salariaux nets $w_i l_i Y_i$, endogène, qui dépend du nombre d'actifs occupés dans chaque classe de ménage (Equation 74).
- Une part ω_{Kh} de la fraction des 'revenus du capital' (de l'Excédent Brut d'Exploitation comptable) revenant aux ménages, EBE_H (cf. Equation 18). Les ω_{Kh} sont exogènes, calibrés à partir de l'enquête Budget des Familles 2001 et du TEE 2004.
- Des transferts sociaux, en trois agrégats (pensions de retraite $\rho_{Ph} N_{Ph}$, allocations chômage $\rho_{Uh} N_{Uh}$, autres transferts sociaux $\rho_{Ah} N_{Ah}$) dont le calcul repose de manière similaire sur le produit d'un revenu par tête ρ et d'une population ciblée N_h . Les populations de retraités N_{Ph} et totales N_{Ah} de chaque classe sont supposées constantes, celles de chômeurs N_{Uh} varient (Equation 73).
- Une part exogène ω_{Ath} de transferts résiduels A_{TH} (qui correspondent à la somme des « autres transferts courants » et des « transferts en capital », comptes D7 et D9, du TEE).
- Un 'service de la dette' $i_H D_h$ qui correspond de fait, l'écrasante majorité des classes étant créancières nettes, à des revenus de la propriété (agrégat D4 du TEE : intérêts, revenus distribués, revenus fonciers *etc.*). Ce service est le produit de la dette nette des classes D_h (généralement

⁴ Le poids des dépenses énergétiques dans le budget, bon indicateur de la vulnérabilité énergétique, dépend de facteurs aussi divers que les climats locaux, la situation spatiale (ruralité, proximité de transports en commun, distance au centre ville ou au lieu de travail), le type d'habitat (appartement, maison individuelle) ou celui d'équipement de chauffage.

négative), dont l'évolution est expliquée ci-dessous (Equation 23) et d'un taux d'intérêt effectif i_H endogène (cf. Equation 67).

D'où

$$R_{DBAih} = \omega_{Lh} \sum_{i=1}^n w_i l_i Y_i + \overline{\omega_{Kh}} EBE_H + \rho_{Ph} \overline{N_{Ph}} + \rho_{Uh} N_{Uh} + \rho_{Ah} \overline{N_h} + \overline{\omega_{ATH}} A_{TH} - i_h D_h, \quad (16)$$

avec notamment A_{TH} et EBE_H définis comme des parts constantes $\overline{\omega_{ATH}}$ et $\overline{\omega_{KH}}$ de A_T (cf. Equation 65) et EBE (cf. Equation 37) :

$$A_{TH} = \overline{\omega_{ATH}} A_T \quad (17)$$

$$EBE_H = \overline{\omega_{KH}} EBE \quad (18)$$

R_{DBh} le revenu disponible brut de la classe h est obtenu en soustrayant de R_{DBAih} l'impôt sur le revenu T_{IRh} dont le taux est supposé constant (Equation 44), et les autres impôts directs acquittés T_h qui évoluent comme l'IPC (Equation 45). R_h le revenu consommé de la classe h se déduit alors du revenu disponible brut par soustraction de l'épargne. Le taux d'épargne τ_{Sh} est exogène, calibré selon le R_{DBh} et le R_h de référence de chaque classe.

$$R_{DBh} = R_{DBAih} - T_{IRh} - T_h \quad (19)$$

$$R_h = (1 - \overline{\tau_{Sh}}) R_{DBh} \quad (20)$$

Poursuivant l'exploitation des données de distribution du TEE, l'investissement des ménages $FBCF_h$ (leur Formation Brute de Capital Fixe) est distinct de leur épargne, et se voit imposer la règle simple d'un ratio fixe au revenu disponible brut. La différence entre l'épargne et l'investissement donne alors CAF_h la capacité d'autofinancement (CAF) de la classe h .

$$\frac{FBCF_h}{R_{DBh}} = \frac{FBCF_{h0}}{R_{DBh0}} \quad (21)$$

$$CAF_h = \overline{\tau_{Sh}} R_{DBh} - FBCF_h \quad (22)$$

L'évolution de CAF_h entre la référence et l'équilibre dérivé permet alors d'estimer l'évolution de la dette nette D_h . Le calcul se fonde sur l'hypothèse simple d'un décrochage progressif de la CAF, au fil des ans, depuis l'origine de la réforme situé à t_{REF} années dans le passé.

$$D_h = CAF_{h0} + \frac{t_{REF}}{2} (CAF_{h0} - CAF_h) \quad (23)$$

II.2.2. Consommation

Alors que les équations qui précèdent s'appliquent à un nombre indéterminé de secteurs, la spécification de la demande des ménages décrite ici est celle d'une version d'IMACLIM-S dont la désagrégation par produits se limite à trois biens énergétiques (pétrole brut, carburants automobiles, autres énergies), et un bien composite agrégat de l'ensemble des autres biens. Les ménages ne consommant pas de pétrole brut, l'arbitrage de leur demande se résume à une consommation de

carburants automobiles C_{CARBh} , une consommation d'autres énergies qui correspond à une consommation d'énergie résidentielle, C_{RESH} , et une consommation de composite C_{COMP_h} .

Une prémisses majeure au traitement de cet arbitrage consiste à considérer que les consommations énergétiques des ménages sont contraintes par des planchers de besoins essentiels, étant donné le temps fini t_{REF} de développement des réformes analysées. Des versions antérieures d'IMACLIM ont traduit cette hypothèse par l'utilisation de fonctions d'utilité de type Stone-Geary. Cependant la fixité des parts budgétaires au-delà de la satisfaction des besoins essentiels a été jugée trop contraignante, sans fondement économétrique réel. En outre, l'utilisation même d'une fonction d'utilité constante, où les consommations d'énergie figureraient en tant que telles, alors que seuls comptent les services énergétiques qui en découlent, est discutable⁵.

Pour ces raisons C_{CARBh} et C_{RESH} les consommations énergétiques des ménages ont été définies, sans recours à une fonction d'utilité explicite, comme la somme d'un besoin de base exogène, commun à l'ensemble des classes, et d'une consommation au-delà de ce besoin qui varie selon des élasticités au revenu consommé réel σ_{CRi} et au prix propre (relatif à l'IPC) σ_{Cpi} . Dans l'attente des résultats de travaux économétriques en cours sur données désagrégées par classes, ces quatre élasticités (deux pour chaque bien) sont calibrées sur séries temporelles de consommations agrégées, donc communes à l'ensemble des classes.

$$\forall i \in [CARB, RES] \quad C_{ih} = \beta_{ih} C_{ih0} + (1 - \beta_{ih}) \left(\frac{p_{Ci}}{IPC} \frac{1}{p_{Ci0}} \right)^{\sigma_{Cpi}} \left(\frac{R_h}{IPC} \frac{1}{R_{h0}} \right)^{\sigma_{CRi}} C_{ih0} \quad (24)$$

Où β_{ih} représente la part de la consommation de référence de la classe h correspondant à un besoin essentiel, et avec les prix indicés comme les consommations qu'ils valorisent.

C_{COMP_h} la demande en bien composite de la classe h est alors simplement définie par le solde de son revenu consommé—ce qui revient à imposer la saturation de la contrainte budgétaire.

$$C_{COMP_h} = R_h - p_{CCARB} C_{CARBh} - p_{CRES} C_{RESH} \quad (25)$$

II.3. Secteur productif (secteur institutionnel des sociétés)

II.3.1. Revenu disponible brut et choix d'investissement

De manière analogue à celui des ménages R_{DBS} le revenu disponible brut des sociétés est défini comme l'addition ou la soustraction :

- d'une part exogène ω_{KS} des revenus du capital *i.e.* de l'EBE (*cf.* Equation 37),

⁵ La mesure idéale du bien-être demeure le calcul d'une variation de revenu équivalente ou compensatoire par recours à une fonction d'utilité. Cette approche soulève cependant deux difficultés : d'une part, point strictement technique, le résultat de l'évaluation peut dépendre fortement de la forme fonctionnelle adoptée, surtout si les besoins incompressibles sont dûment pris en compte ; d'autre part, point théorique plus complexe, il est peu satisfaisant de raisonner à fonction d'utilité constante : des prix du carbone forts ne peuvent manquer de transformer la fonction d'utilité en induisant un ensemble de décisions privées et publiques qui modifient, par exemple, l'utilité marginale du kilomètre parcouru en voiture.

- d'un 'service de la dette' (intérêts, dividendes) $i_S D_S$, fortement positif en référence (les sociétés sont endettées), calculé sur un taux i_S évoluant comme i_H (Equation 67),
- et d'une part exogène ω_{ATS} des autres transferts A_T , qui sont supposés constituer une part fixe du PIB (Equation 65).

$$R_{DBS} = \overline{\omega_{KS}} EBE - i_S D_S - T_{IS} + \overline{\omega_{ATS}} A_T \quad (26)$$

Le ratio de la FBCF des sociétés à ce RDB est supposé constant ; comme pour les ménages et conformément à la comptabilité nationale la CAF découle alors de la différence entre le R_{DBS} et la $FBCF_S$. La dette nette des sociétés est calculée à partir de la CAF selon le même raisonnement que celui appliqué aux ménages.

$$\frac{FBCF_S}{R_{DBS}} = \frac{FBCF_{S0}}{R_{DBS0}} \quad (27)$$

$$CAF_S = R_{DBS} - FBCF_S \quad (28)$$

$$D_S = CAF_{S0} + \frac{t_{REF}}{2} (CAF_{S0} - CAF_S) \quad (29)$$

II.3.2. Arbitrages dans la production

Pour des raisons analogues à celles présentées concernant la demande des ménages, les arbitrages de la production, qui font par ailleurs l'objet d'une publication spécifique (Gherzi et Hourcade, 2006), se font sous l'hypothèse que des asymptotes techniques contraignent les consommations unitaires de facteurs au-dessus de valeurs planchers. Faute de simulations *bottom-up* exploitables, le travail de calibrage sur pseudo-données décrit *in* (Gherzi et Hourcade, 2006) n'a pu être mené pour la situation particulière de la France en 2004, et nous avons dû nous contenter de supposer que les parts *variables* des consommations des six facteurs (quatre consommations intermédiaires, travail et capital) sont substituables selon une spécification CES—le fait d'imposer des asymptotes garantit bien que l'élasticité de substitution des consommations unitaires *totales* (part fixe et part variable) n'est pas fixe mais décroît bien au fur et à mesure que telle consommation ou telle autre se rapproche de son asymptote.

Sous ces hypothèses et contraintes, la minimisation des coûts unitaires de production débouche sur une formulation des consommations unitaires de facteurs secondaires α_{ji} , de travail l_i et de capital k_i qui s'écrit comme la somme de la valeur plancher, et d'une consommation au-delà de cette valeur, où l'on retrouve l'expression connue des demandes conditionnelles de facteurs d'une fonction de production CES d'élasticité σ (dont les coefficients λ_{Clij} , λ_{Li0} et λ_{Ki0} sont calibrés à l'équilibre de référence).

$$\alpha_{ji} = \frac{\Theta_i}{\Phi_i} \left[\beta_{ji} \alpha_{ji0} + \left(\frac{\lambda_{ji}}{p_{Clij}} \right)^\sigma \left(\sum_{j=1}^n \lambda_{ji}^\sigma p_{Clij}^{1-\sigma} + \lambda_{Li}^\sigma p_{Li}^{1-\sigma} + \lambda_{Ki}^\sigma p_K^{1-\sigma} \right)^{\frac{1}{\rho}} \right] \quad (30)$$

$$l_i = \frac{\Theta_i}{\Phi_i} \left[\beta_{Li} l_{i0} + \left(\frac{\lambda_{Li}}{p_{Li}} \right)^\sigma \left(\sum_{j=1}^n \lambda_{ji}^\sigma p_{Cfji}^{1-\sigma} + \lambda_{Li}^\sigma p_{Li}^{1-\sigma} + \lambda_{Ki}^\sigma p_K^{1-\sigma} \right)^{\frac{1}{\rho}} \right] \quad (31)$$

$$k_i = \frac{\Theta_i}{\Phi_i} \left[\beta_{Ki} k_{i0} + \left(\frac{\lambda_{Ki}}{p_{Ki}} \right)^\sigma \left(\sum_{j=1}^n \lambda_{ji}^\sigma p_{Cfji}^{1-\sigma} + \lambda_{Li}^\sigma p_{Li}^{1-\sigma} + \lambda_{Ki}^\sigma p_K^{1-\sigma} \right)^{\frac{1}{\rho}} \right], \quad (32)$$

avec par commodité d'écriture

$$\rho = \frac{\sigma - 1}{\sigma} \quad (33)$$

Cette somme est toutefois modifiée de la prise en compte conjuguée de coefficients de rendements décroissants statiques Θ_i et de progrès technique endogène Φ_i . Les rendements décroissants statiques Θ_i sont supposés s'ajuster aux volumes produits selon des élasticités $\sigma_{\Theta Y_i}$ définies de manière à tenir l'hypothèse d'une tarification au coût marginal. Le coefficient Φ_i traduit l'hypothèse d'un progrès technique endogène neutre au sens de Hicks ; il est élastique à la variation du volume de consommation de capital fixe retenue comme une approximation de celle de l'investissement cumulé. Dans le modèle à quatre secteurs Φ_i est neutralisé (identique à 1) pour les productions énergétiques⁶, et ne joue que pour la production composite.

$$\Theta_i = \left(\frac{Y_i}{Y_{i0}} \right)^{\sigma_{\Theta Y_i}} \quad (34)$$

$$\sigma_{\Theta Y_i} = \frac{\bar{\pi}_i}{1 - \pi_i} \quad (35)$$

$$\Phi_i = \left(\frac{k_i Y_i}{k_{i0} Y_{i0}} \right)^{\sigma_{\Phi_i}} \quad (36)$$

Soulignons à nouveau que le 'prix du capital' p_K qui entre dans les arbitrages de la production est *stricto sensu* le prix du 'capital machine', donc une simple somme pondérée des prix à l'investissement des différents biens immobilisés (Equation 14), sans lien avec les taux d'intérêts pratiqués sur les marchés financiers : d'un côté part les arbitrages de la production sont pratiqués sur le strict coût des intrants, parmi lesquels celui du capital physique k_i (calibré sur les consommations de capital fixe du TES) ; d'un autre côté, indépendamment de cet arbitrage, l'exploitation et une règle d'autofinancement de l'investissement ($FBCF_S$, Equation 27) débouchent sur une variation des positions financières D_S , dont le service n'est pas supposé peser sur l'intrant capital physique plus que sur les autres intrants.

⁶ Lorsqu'IMACLIM est calibré sur une modélisation *bottom-up* suivant Ghersi et Hourcade (2006), le progrès technique des secteurs énergétiques est en effet dûment pris en compte dans le calibrage des enveloppes de production des biens énergétiques. En l'absence d'un tel calibrage la neutralisation du coefficient Φ permet de concentrer la variabilité comportementale des productions énergétiques sur les seuls planchers et élasticités de substitution.

II.3.3. Excédent brut d'exploitation

Des arbitrages dans les i productions et de la règle de taux de marge π_i et de taux de marge spécifiques τ_{MS} constants, découle l'Excédent Brut d'Exploitation (EBE) :

$$EBE = \sum_{i=1}^n \left(p_{K_i} k_i Y_i + \overline{\pi}_i p_{Y_i} Y_i \right) + M_S \quad (37)$$

Cet EBE, qui correspond à la rémunération du capital, constitue un revenu que les agents se partagent en parts constantes calibrées à l'équilibre de référence⁷. Les marges spécifiques se compensent en référence, par construction (lors de la procédure d'hybridation), mais le maintien de leurs taux sans lien avec l'évolution des prix sur lesquels elles sont imposées annule cette compensation systématique dans les équilibres dérivés. Leur expression est alors :

$$M_S = \sum_i \sum_j \overline{\tau_{MSC_{ij}}} p_i \alpha_{ij} Y_j + \left(\overline{\tau_{MSC_i}} p_i C_i + \overline{\tau_{MSG_i}} p_i G_i + \overline{\tau_{MSI_i}} p_i I_i + \overline{\tau_{MSX_i}} p_i X_i \right) \quad (38)$$

II.4. Administrations publiques

II.4.1. Prélèvements obligatoires et option de politique budgétaire

Les prélèvements obligatoires constituent la majorité des ressources des administrations publiques. Dans les versions du modèle correspondant à notre réforme centrale (substitution de la taxe à une part des cotisations euro pour euro, ajustement supplémentaire des cotisations pour les options RDPC d'un ratio de la dette publique au PIB constant et PFC d'une pression fiscale constante), les taux et accises autres que la taxe carbone et les cotisations sociales sont supposés invariants, et les différents produits fiscaux qui en découlent se définissent par application de ces taux à leurs assiettes respectives :

$$T_Y = \sum_{i=1}^n \overline{\tau_{Y_i}} p_{Y_i} Y_i \quad (39)$$

$$T_{TIPP} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \overline{t_{TIPP_{C_{ji}}}} \alpha_{ji} Y_i + \sum_{i=1}^n \overline{t_{TIPP_{CF_i}}} (C_i + G_i + I_i) \quad (40)$$

$$T_{AIP} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \overline{t_{AIP_j}} \alpha_{ji} Y_i + \sum_{i=1}^n \overline{t_{AIP_i}} (C_i + G_i + I_i) \quad (41)$$

$$T_{TVA} = \sum_{i=1}^n \frac{\overline{\tau_{TVA_i}}}{1 + \overline{\tau_{TVA_i}}} (p_{C_i} C_i + p_{G_i} G_i + p_{I_i} I_i) \quad (42)$$

⁷ Ces parts devraient plutôt varier avec les FBCF respectives des agents, qui traduisent l'évolution de la propriété du capital. La relative stabilité des parts dans la FBCF, l'absence quasi-totale d'impact sur les résultats agrégés (l'effet n'est que distributif) et l'absence de spécification satisfaisante, ont conduit à cette simplification.

$$T_{IS} = \overline{\tau_{IS}} EBE_S \quad (43)$$

$$T_{IRh} = \overline{\tau_{IRh}} R_{DBA1h} \quad (44)$$

$$T_h = IPC T_{h0} \quad (45)$$

Le produit fiscal de la taxe carbone T_{CARB} comme le total des cotisations sociales T_{CS} suivent cette même logique :

$$T_{CS} = \tau_{CS} \sum_{i=1}^n w_i l_i Y_i \quad (46)$$

$$T_{CARB} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n t_{CI} \gamma_{C1ji} \alpha_{ji} Y_i + \sum_{i=1}^n t_{CF} \gamma_{CFi} C_i, \quad (47)$$

mais la taxe carbone sur les consommations intermédiaires (t_{CI}) comme sur les consommations finales (t_{CF}) est de toute évidence exogène (c'est la principale variable de contrôle du modèle), et le taux des cotisations s'ajuste selon l'option de politique budgétaire retenue, de sorte que :

- dans l'option 'fiscalité constante' (FC), la masse des cotisations soit diminuée du montant exact du produit fiscal de la taxe carbone (Equation 48) ;
- dans l'option 'pression fiscale constante' (PFC), le ratio de la somme des prélèvements obligatoires au PIB soit maintenu (Equation 49) ;
- dans l'option d'un ratio de la dette publique au PIB constant (RDPC), cette dernière contrainte est vérifiée (Equation 50).

$$T_{CS} = T_{CS0} - T_{CARB} \quad (48)$$

$$\frac{T}{PIB} = \frac{T_0}{PIB_0} \quad (49)$$

$$\frac{D_G}{PIB} = \frac{D_{G0}}{PIB_0} \quad (50)$$

avec T la somme des prélèvements obligatoires :

$$T = T_{CS} + T_Y + T_{TIPP} + T_{AIP} + T_{TVA} + T_{IS} + \sum_{h=1}^m T_{IRh} + \sum_{h=1}^m T_h + T_{CARB} \quad (51)$$

II.4.2. Revenu disponible brut, dépenses, investissement et transfert

Similaire à celui des ménages et des sociétés (selon la même logique prévalant au TEE), R_{DBG} le revenu disponible brut des administrations publiques est composé de la somme des prélèvements obligatoires T et de parts exogènes ω_{KG} de l'EBE et ω_{ATG} des 'autres transferts' A_T , à quoi on soustrait les dépenses publiques $p_G G$, un ensemble de transferts sociaux R_P , R_U et R_A ainsi que le service de la dette $i_G D_G$:

$$R_{DBG} = T + \overline{\omega_{KG}} EBE + \overline{\omega_{ATG}} A_T - \sum_{i=1}^n p_{Gi} G_i - R_P - R_U - R_A - i_G D_G \quad (52)$$

Afin qu'elles suivent l'évolution de la richesse nationale, $p_G G$ les dépenses publiques sont supposées constituer une part constante du PIB :

$$\frac{\sum_{i=1}^n p_{Gi} G_i}{PIB} = \frac{\sum_{i=1}^n p_{Gi0} G_{i0}}{PIB_0} , \quad (53)$$

Les transferts sociaux R_P , R_U et R_A sont la somme sur l'ensemble des classes de ménages h des transferts par classe définis plus haut comme composante du RDBAI des classes (Equation 16) :

$$R_P = \sum_{h=1}^m \overline{N_{Ph}} \rho_{Ph} \quad (54)$$

$$R_U = \sum_{h=1}^m \overline{N_{Uh}} \rho_{Uh} \quad (55)$$

$$R_A = \sum_{h=1}^m \overline{N_h} \rho_{Ah} , \quad (56)$$

sachant que les transferts par tête ρ_P , ρ_U et ρ_A sont indexés sur le salaire moyen :

$$\forall K \in [P, U, A], \forall h \in [1, m] \quad \rho_{Kh} = \frac{w}{w_0} \rho_{Kh0} \quad (57)$$

Enfin, le taux i_G auquel les intérêts de la dette D_G sont servis suit une même évolution que i_H et i_S (Equation 67).

L'investissement public $FBCF_G$, comme les dépenses $p_G G$, est supposé constituer une part constante du PIB. Soustrait au RDB il donne la CAF, qui détermine l'évolution de la dette D_G :

$$\frac{FBCF_G}{PIB} = \frac{FBCF_{G0}}{PIB_0} \quad (58)$$

$$CAF_G = R_{DBG} - FBCF_G \quad (59)$$

$$D_G = CAF_{G0} + \frac{t_{REF}}{2} (CAF_{G0} - CAF_G) \quad (60)$$

II.5. 'Reste du monde'

II.5.1. Echanges de biens et services

En matière d'échanges internationaux l'hypothèse retenue est celle d'une économie ouverte dont le poids ne suffit pas à influencer les prix de vente mondiaux—l'ensemble des prix à l'importation p_M conservent leurs valeurs relatives (Equation 2).

On suppose alors, pour la majorité des biens, que le ratio des importations à la production domestique d'une part, et les volumes exportés 'absolus' d'autre part, sont élastiques aux termes de l'échange, selon des élasticités fixes propres à chaque bien⁸ :

$$\frac{M_i}{Y_i} = \frac{M_{i0}}{Y_{i0}} \left(\frac{p_{Mi0}}{p_{Yi0}} \frac{p_{Yi}}{p_{Mi}} \right)^{\sigma_{Mpi}} \quad (61)$$

$$\frac{X_i}{X_{i0}} = \left(\frac{p_{Mi0}}{p_{Xi0}} \frac{p_{Xi}}{p_{Mi}} \right)^{\sigma_{Xpi}} \quad (62)$$

La différence de traitement des importations et des exportations ne fait que traduire l'hypothèse que, hors variations des termes de l'échange, les volumes importés progressent proportionnellement à l'activité économique (la production domestique), tandis que ceux exportés ne varient pas (la demande mondiale est supposée constante). Elle implique cependant qu'une amélioration des termes de l'échange ne signifie pas nécessairement une amélioration de la balance commerciale, selon les variations de l'activité concomitantes.

Exception à cette règle, dans les versions calibrées sur la France les importations d'énergies fossiles brutes sont supposées constituer mécaniquement le solde des ressources nécessaires à l'équilibre des marchés en question, étant donné une hypothèse de fixité des productions domestiques d'énergies fossiles (négligeables dans les périodes récentes).

II.5.2. Flux de capitaux et CAF

Les flux de capitaux du RDM ne se voient pas assigner un comportement spécifique, mais sont simplement déterminés comme le solde des flux de capitaux des trois secteurs institutionnels nationaux (ménages, sociétés, administrations publiques), afin de garantir l'équilibre comptable des échanges. Cette hypothèse détermine la CAF du RDM, qui à nouveau détermine l'évolution de D_{RDM} sa dette financière nette :

$$CAF_{RDM} = \sum_{i=1}^n p_{Mi} M_i - \sum_{i=1}^n p_{Xi} X_i + \sum_{K=H,S,G} i_K D_K - \sum_{K=H,S,G} A_{TK} \quad (63)$$

$$D_{RDM} = CAF_{RDM0} + \frac{t_{REF}}{2} (CAF_{RDM0} - CAF_{RDM}) \quad (64)$$

Par construction les CAF des quatre agents s'équilibrent (leur somme est nulle), et en conséquence les positions nettes, systématiquement construites sur ces CAF, évoluent d'une position où elles se compensent strictement à une autre (on pourrait de fait substituer à l'équation une condition de nullité de la somme des dettes sans impacter les résultats du modèle). L'hypothèse d'une 'compensation' systématique par le RDM des revenus de la propriété des agents nationaux, sans aucun lien avec la dette D_{RDM} , peut sembler fruste, mais ne fait *in fine* que reproduire la méthode de construction du TEE. De fait en référence le taux d'intérêt effectif du RDM (ratio de sa dette nette à

⁸ Etant donné l'hypothèse de prix internationaux invariants les ratios M/Y et les volumes X sont *de facto* élastiques aux seules variations des prix de production et d'exportation.

ses revenus de la propriété), qui résulte en dernier ressort d'une myriade de positions débitrices et créditrices ainsi que des flux de capitaux qui sont attachés, est négatif—inexploitable pour notre modélisation.

Pour terminer, comme nous l'avons évoqué les autres transferts A_T (« autres transferts courants » et des « transferts en capital », comptes D7 et D9, du TEE) sont supposés constituer une part fixe du PIB⁹ :

$$\frac{A_T}{PIB} = \frac{A_{T0}}{PIB_0} \quad (65)$$

II.6. Equilibres sur les marchés

II.6.1. Biens et services

L'équilibre sur le marché des biens est un simple équilibre comptable entre ressources (production et importations) et emplois (consommation des ménages et des administrations publiques, investissement, exportations). Grâce à la procédure d'hybridation, pour les biens énergétiques cette équation est posée en MTEP et conforme au bilan énergétique 2004 de l'AIE (les G et I de ces biens sont nuls par définition).

$$Y_i + M_i = C_i + G_i + I_i + X_i \quad (66)$$

II.6.2. Investissement et flux de capitaux

Les taux d'intérêt apparents i_H , i_S et i_G auxquels font face les ménages, les sociétés et les administrations publiques permettent d'équilibrer le marché de l'investissement : leur évolution, d'un différentiel de points δ_i supposé identique (Equation 67), modifie le revenu disponible des ménages RDBG et celui des sociétés RDBS, dont découle directement leurs FBCF respectives $FBCF_H$ et $FBCF_S$, de manière à ce que l'offre de capital qu'elles assurent, associées à la FBCF publique $FBCF_G$, le financement des immobilisations $p_{li} I_i$ (Equation 68) ; ces immobilisations se font quant à elles de façon à ce que le ratio de la consommation de capital fixe réelle totale (la somme des $k_i Y_i$) à chacun des volumes immobilisés I_i , soit constant. En d'autres termes, le capital immobilisé par les différents secteurs est supposé homogène, et l'ensemble de ses composantes varient comme la consommation de capital fixe agrégée.

$$\forall K \in [H, S, G] \quad i_K = i_{K0} + \delta_i \quad (67)$$

$$\sum_{K=H,S,G} FBCF_K = \sum_{i=1}^n p_{li} I_i \quad (68)$$

⁹ La somme sur les agents des comptes D7 et D9 étant par définition nulle (transferts entre agents) A_T est en fait calibré sur la somme des autres transferts strictement positifs. En conséquence les parts ω_{ATH} , ω_{ATS} , ω_{ATG} et ω_{ATRDM} sont à proprement parler des ratios puisque leur somme est par construction égale à 0.

$$\frac{I_i}{\sum_{j=1}^n k_j Y_j} = \frac{I_{i0}}{\sum_{j=1}^n k_{j0} Y_{j0}} \quad (69)$$

La clôture du modèle se fait donc sur l'offre d'investissement des agents, qui s'adapte mécaniquement à la demande d'investissement des productions. Par la variation des taux d'intérêt elle induit des variations de flux financiers entre agents créditeurs et débiteurs, qui se traduisent ultimement dans l'évolution de leurs positions financières nettes. Dès lors que l'option budgétaire retenue pour le comportement des administrations publiques suppose un quelconque contrôle de l'endettement, un effet en retour est obtenu par l'ajustement des fiscalités qui sont désignées comme les variables de ce contrôle (dans l'hypothèse centrale les cotisations sociales).

II.6.3. Emploi

L'équilibre sur le marché de l'emploi résulte de la confrontation de l'offre d'emploi des systèmes de production, égal à la somme de leurs demandes de facteur $l_i Y_i$, et de l'offre de travail des ménages. La dotation en travail des ménages L est supposée constante (calibrée sur le total équivalents temps plein de la population active en référence), mais le modèle autorise un taux de chômage u non nul et la condition d'équilibre s'écrit donc :

$$(1-u)\bar{L} = \sum_{i=1}^n l_i Y_i \quad (70)$$

Plutôt que de caractériser un comportement d'offre de travail le modèle se contente de déduire les variations de u d'une courbe salaire-chômage, qui décrit une corrélation empirique entre le salaire moyen réel w et le taux de chômage u , traduite par une élasticité constante σ_{wU} :

$$\frac{w}{IPC} = w_0 \left(\frac{u}{u_0} \right)^{\sigma_{wU}} \quad (71)$$

Sans prendre parti pour une interprétation en termes de pouvoir de négociation du salarié face à son employeur, ou pour les théories du salaire d'efficience, l'intuition sous-jacente et immédiate est que toute hausse du chômage crée une pression à la baisse sur les salaires.

Les variations d'emploi correspondant à l'évolution de u sont ensuite réparties entre les classes de ménages selon leur taux de chômage spécifique u_h :

$$u_h = u_{h0} \frac{u}{u_0} \quad (72)$$

d'où N_{Uh} le nombre de chômeurs de chaque classe :

$$N_{Uh} = u_h \bar{L}_h \quad (73)$$

N_{Lh} le nombre d'actifs de la classe h (défini comme $L_h - N_{Uh}$) permet en outre de définir la part ω_{Lh} des revenus du travail qui revient à la classe h :

$$\omega_{Lh} = \frac{\frac{N_{Lh}}{N_{Lh0}} \omega_{Lh0}}{\sum_{h=1}^m \frac{N_{Lh}}{N_{Lh0}} \omega_{Lh0}} \quad (74)$$

III. Hypothèses et calibrage des équations comportementales

Les résultats des simulations d'IMACLIM-S reposent pour une grande part sur le simple jeu de la propagation comptable de la taxe dans l'économie, mais aussi sur quatre jeux d'hypothèses comportementales :

- La capacité d'adaptation du système productif : chacune des quatre productions décrites ajuste ses intrants de 6 facteurs (quatre consommations intermédiaires, travail, capital) dans des limites asymptotiques fixées elles-aussi de manière exogène. L'élasticité de substitution entre fractions variables des volumes d'intrants est fixée à 60%, dans la lignée d'une abondante littérature¹⁰.
- La capacité des ménages à adapter leur consommation, synthétisée par une élasticité-prix et une élasticité-revenu pour chacune de leurs deux consommations d'énergie, élasticités obtenues par économétrie sur séries temporelles 1960-2007. Ces élasticités sont en outre supposées décroître avec le niveau de la taxe, la consommation tendant ainsi de manière asymptotique vers un besoin de base incompressible¹¹. Les asymptotes des consommations énergétiques sont identiques pour les 20 classes de ménages décrites (luxe de détail que nous n'exploiterons qu'au chapitre suivant), et fixées à 80% des consommations par tête moyennes de la classe pour qui elles sont les plus faibles.
- Le comportements de demande de travail des ménages : n'est décrit que de manière implicite, l'équilibre du marché de l'emploi étant caractérisé par une boucle salaire-chômage qui impose une corrélation négative entre taux de chômage et salaire. Cette corrélation est caractérisée par une élasticité constante fixée à 10%¹², selon la littérature (Blanchflower et Oswald, 2005), et s'applique plus précisément au salaire moyen nominal. Le choix du salaire nominal plutôt que du salaire réel traduit les contraintes concurrentielles qui pèsent sur le marché de l'emploi français. Le contexte de modération salariale qu'il impose limite les effets de propagation de la hausse des prix de l'énergie et accélère la substitution en faveur du travail, mais il autorise aussi des pertes de salaire réel plus substantielles.
- Les termes de la compétition vis-à-vis des productions internationales : la part des importations dans la ressource totale de chacun des quatre biens, de même que le volume absolu d'exportation de ces mêmes biens, répondent aux variations des termes de l'échange selon des élasticités assises sur une compatibilité aux conclusions d'une note récente de l'INSEE en ces matières (Cachia, 2008).

¹⁰ Une hausse d'un pourcentage marginal du rapport des prix de deux facteurs se traduit donc par une baisse de 0,6 fois ce pourcentage du ratio de la part supposée variable de leurs consommations.

¹¹ Les raisons de ce parti-pris de modélisation sont décrites dans un numéro spécial de *The Energy Journal* sur la modélisation hybride (Hourcade *et al.*, 2006 ; Ghersi et Hourcade, 2006).

¹² Une hausse d'un pourcentage marginal du taux de chômage implique donc une baisse du salaire de 0,1 fois ce pourcentage.

Références bibliographiques

- Blanchflower, D. & Oswald, A., 1995, “An introduction to the wage curve”, *The Journal of Economic Perspectives*, 153-167.
- Blanchflower, D.G. & Oswald, A.J., 2005, “The Wage Curve Reloaded”, *National Bureau of Economic Research Working Paper Series*, No. 11338.
<http://www.nber.org/papers/w11338>.
- Cachia F., 2008, *Les Effets de l'Appréciation de l'Euro sur l'Économie Française*, Division Synthèse Conjoncturelle, INSEE, 47 p.
- Combet, E., 2007, “Evaluation des effets distributifs de politiques publiques dans un cadre d'équilibre général calculable - Application au cas de réformes fiscales environnementales : le double-dividende revisité”, *mémoire de Master EDDEE, archives CIREC*.
- Erkel-Rousse, H. & Mirza, D., 2002. “Import Price Elasticities: Reconsidering the Evidence”, *The Canadian Journal of Economics / Revue canadienne d'Economie* , 35(2), 282-306.
- Gherzi, F., 2009. “Impact assessments of climate policies: Imaclim-S”, in V. Bosetti, R.Gerlagh et S. Schleichner (Ed.), *Modelling Sustainable Development. Transitions to a Sustainable Future*, Edward Elgar, Cheltenham, Royaume-Uni, pp. 168-178.
- Gherzi, F. & Hourcade, J., 2006, “Macroeconomic consistency issues in E3 modeling: the continued fable of the elephant and the rabbit”, *The Energy Journal*, Special Issue n°2, 27-49.

Notations du modèle

Le *calibrage* consiste à donner un jeu de valeurs à l'ensemble des variables puis à résoudre le système pour déterminer celles que doivent prendre les paramètres afin que les équations soient respectées. L'exercice revient donc à déterminer quelles valeurs les paramètres doivent-ils prendre pour que les grandeurs tirées de comptes réels équilibrés puissent être liées entre elles par les équations considérées.

Tous les paramètres ne tirent cependant pas leur valeur de cette opération de calibrage ; la taxe carbone sur les consommations intermédiaires, par exemple, est un paramètre exogène (une variable de contrôle) ; d'autres paramètres sont construits à partir des valeurs de l'équilibre initial, mais selon des équations qui ne sont pas celles du modèle IMACLIM-S à proprement parler ; d'autres enfin voient leurs valeurs fixées en fonction des résultats de modèles technico-économiques. En conséquence de ces distinctions, les notations ci-dessous sont présentées en trois catégories, et dans chacune de ces catégories par ordre alphabétique (les lettres grecques étant classées selon leur dénomination française et non selon leur équivalence dans l'alphabet latin).

Variables endogènes

α_{ij}	Coefficient technique, quantité de bien i nécessaire à la production de bien j
A_T	Autres transferts (équivalent des comptes D7 et D9 du TEE)
A_{TH}	Autres transferts aux ménages
A_{TS}	Autres transferts aux sociétés
A_{TG}	Autres transferts aux administrations publiques
CAF_H	Capacité d'autofinancement de la classe h
CAF_S	Capacité d'autofinancement des sociétés
CAF_G	Capacité d'autofinancement des administrations publiques
CAF_{RDM}	Capacité d'autofinancement du reste du monde
C_{ih}	Consommation finale de bien i de la classe h
D_h	Dette nette de la classe h (équivalent du patrimoine financier net des comptes de patrimoine de l'INSEE)
D_S	Dette nette des sociétés (équivalent du patrimoine financier net des comptes de patrimoine de l'INSEE)
D_G	Dette publique nette (équivalent du patrimoine financier net des comptes de patrimoine de l'INSEE)
D_{RDM}	Dette nette du reste du monde

(équivalent du patrimoine financier net des comptes de patrimoine de l'INSEE)

δ_i	Différentiel de taux d'intérêt
δ_{CS_h}	Variation des coûts salariaux d'une classe h
EBE_H	Excédent brut d'exploitation des ménages
EBE_S	Excédent brut d'exploitation des sociétés
EBE_G	Excédent brut d'exploitation des administrations publiques
$FBCF_H$	Formation brute de capital fixe de la classe h
$FBCF_S$	Formation brute de capital fixe des sociétés
$FBCF_G$	Formation brute de capital fixe des administrations publiques
γ_{Cij}	Emission de CO ₂ par unité de bien i consommée pour la production de bien j
γ_{Ci}	Emission de CO ₂ par unité de bien i consommée par les ménages
G_i	Consommation finale des administrations publiques du bien i
i_H	Taux d'intérêt effectif sur la dette des ménages
i_S	Taux d'intérêt effectif sur la dette des sociétés
i_G	Taux d'intérêt effectif sur la dette des administrations publiques
I_i	Consommation finale du bien i pour l'investissement
IPC	Indice des prix à la consommation (de Fisher)
k_i	Intensité en capital du bien i (besoin unitaire en capital du bien i)
l_i	Intensité en travail du bien i (besoin unitaire en travail du bien i)
ω_{Lh}	Part des revenus du travail captée par la classe h
M_i	Importations de bien i
M_S	Somme des marges spécifiques
N_{Lh}	Importations de bien i
p_{Mi}	Prix à l'importation du bien i
p_i	Prix moyen de la ressource en bien i
p_{Cij}	Prix à la consommation intermédiaire du bien i pour la production de bien j
p_{Ci}	Prix à la consommation finale des ménages du bien i
p_{Gi}	Prix à la consommation finale du gouvernement du bien i
p_{Ii}	Prix à la consommation finale du bien i pour l'investissement
Φ_i	Coefficient de progrès technique endogène dans la production de bien i
p_K	Coût du facteur capital (somme pondérée du prix des biens d'investissement)
p_{Li}	Coût du travail pour la production d'une unité de bien i

p_{Xi}	Prix du bien i à l'exportation
p_{Yi}	Prix du bien i au producteur
R_{DBAIh}	Revenu disponible brut avant impôt de la classe h
R_{DBH}	Revenu disponible brut de la classe h
R_{DBS}	Revenu disponible brut des sociétés
R_{DBG}	Revenu disponible brut des administrations publiques
R_h	Revenu consommé de la classe h
R_A	Transferts sociaux aux ménages autres que les retraites et les allocations chômage
R_U	Total des allocations chômage
R_S	Total des pensions de retraite
ρ_{Ah}	Autres transferts moyens par tête pour la classe h
ρ_{Ph}	Transferts moyens par tête aux retraités de la classe h
ρ_{Uh}	Transferts moyens par tête aux chômeurs de la classe h
T	Somme des prélèvements obligatoires
T_{CS}	Somme des cotisations sociales salariales et patronales
T_{TIPP}	Somme des recettes de TIPP
T_{AIP}	Somme des recettes des impôts sur produits autres que la TIPP
T_{TVA}	Somme des recettes de TVA
T_{IS}	Somme des recettes de l'impôt sur les sociétés
T_{IRh}	Recettes de l'impôt sur le revenu de la classe h
T_h	Autres impôts directs acquittés par la classe h
T_{CARB}	Produit fiscal de la taxe carbone
Θ_i	Coefficient de rendements d'échelle décroissants dans la production i
τ_{CS}	Taux de cotisations sociales applicable aux salaires nets
τ_{MCCOM}	Taux de marge commerciale sur le bien commercial (ou l'agrégat qui l'englobe)
$\tau_{MCTRANS}$	Taux de marge de transport sur le bien transport (ou l'agrégat qui l'englobe)
u	Taux de chômage total
u_h	Taux de chômage de la classe h
w_i	Salaire net moyen dans la production de bien i
w	Salaire net moyen toutes productions confondues
X_i	Exportations de bien i
Y_i	Production de bien i

Paramètres calibrés sur données statistiques

\bar{L}	Population active mesurée en équivalents temps plein (donnée INSEE)
\bar{L}_h	Population active de la classe h (équivalents temps plein). Calibrée par application au total L , des parts de la population active constatées sur l'agrégation en m classes de l'échantillon de 10305 ménages de l'enquête Budget des Familles 2001 de l'INSEE.
$\lambda_{ij}, \lambda_{Li}, \lambda_{Ki}$	Coefficients de la fonction de production CES sur les parts variables des demandes conditionnelles de facteurs. Calibrés selon les conditions de premier ordre de minimisation des coûts appliquées à l'équilibre de référence (fonctions des prix p_{CIj0} , p_{Li0} et p_{Ki0} , des quantités a_{ij0} , l_{i0} et k_{i0} , ainsi que des parts incompressibles β_{ij} , β_{Ki} et β_{Li}).
\bar{N}_h	Population totale de la classe h . Calibrée par application à la population totale 2004, des parts de la population totale constatées sur l'agrégation en m classes de l'échantillon de 10305 ménages de l'enquête Budget des Familles 2001 de l'INSEE.
\bar{N}_{ph}	Nombre de retraités dans la classe h . Calibré par application à la population retraitée 2004, des parts de la population retraitée constatées sur l'agrégation en m classes de l'échantillon de 10305 ménages de l'enquête Budget des Familles 2001 de l'INSEE.
$\bar{\omega}_{Ath}$	Part des autres transferts captés par les ménages qui échoit à la classe h . Calibrée comme la part captée par la classe h des revenus autres que ceux du travail, dans l'agrégation en m classes de l'échantillon de 10305 ménages de l'enquête Budget des Familles 2001 de l'INSEE.
$\bar{\omega}_{ATH}$	Part des autres transferts captée par les ménages (toutes classes confondues). Calibrée sur le TEE.
$\bar{\omega}_{ATS}$	Part des autres transferts captée par les sociétés. Calibrée sur le TEE (agrégat des sociétés financières et non financières, ainsi que des institutions sans but lucratif).
$\bar{\omega}_{ATG}$	Part des autres transferts captée par les administrations publiques. Calibrée sur le TEE.
$\bar{\omega}_{Kh}$	Part des revenus du capital captés par les ménages qui échoit à la classe h . Calibrée comme la part captée par la classe h des revenus autres que ceux du travail, dans l'agrégation en m classes de l'échantillon de 10305 ménages de l'enquête Budget des Familles 2001 de l'INSEE.
$\bar{\omega}_{KH}$	Part des revenus du capital captée par les ménages (toutes classes confondues). Calibrée sur le TEE.
$\bar{\omega}_{KS}$	Part des revenus du capital captée par les sociétés. Calibrée sur le TEE (agrégat des sociétés financières et non financières, ainsi que des institutions sans but lucratif).
$\bar{\omega}_{KG}$	Part des revenus du capital captée par les administrations publiques. Calibrée sur le

TEE.

π_i	Taux de marge (excédent net d'exploitation, ENE) dans la production de bien i . Calibré comme un simple ratio de l'ENE à la production distribuée (donnée par le TES), après calcul de l'ENE comme la différence de l'EBE et de la consommation de capital fixe des branches (données INSEE).
t_{AIPCI}	Autres impôts sur produits par unité de consommation du bien i . Calibré en rapportant le produit fiscal affecté à chaque produit i (donnée TES corrigée de la TIPP) au volume consommé en référence $Y_{i0} + M_{i0} - X_{i0}$ (les exportations sont supposées exonérées).
$t_{TIPPCFi}$	TIPP par TEP de carburant sur les consommations finales. La TIPP est isolée des autres impôts sur produits et affectée aux produits GG15 et GG2B (TICGN) : produits pétroliers raffinés et gaz naturel. La ventilation entre TIPP supportée par les ventes intermédiaires et les ventes finales de combustibles est réalisée à partir des données du CPDP.
t_{TIPPCi}	TIPP par TEP de carburant sur les consommations intermédiaires. La TIPP est isolée des autres impôts sur produits et affectée aux produits GG15 et GG2B (TICGN) : produits pétroliers raffinés et gaz naturel. La ventilation entre TIPP supportée par les ventes intermédiaires et les ventes finales de combustibles est réalisée à partir des données du CPDP.
τ_{IRh}	Taux effectif d'impôt sur le revenu de la classe h . Calibré comme le ratio de l'IR au <i>RDBAI</i> , après répartition du total national d'IR entre les m classes selon celle observée pour les paiements d'IR dans l'agrégation en m classes de l'échantillon de 10305 ménages de l'enquête Budget des Familles 2001 de l'INSEE.
τ_{IS}	Taux effectif d'impôt sur les sociétés. Calibré comme le ratio du produit fiscal de l'impôt sur les sociétés à la part de l'EBE qui échoit aux sociétés (fait l'approximation que la part de l'ENE dans l'EBE est constante).
τ_{MSCij}	Taux de marge spécifique sur les consommations intermédiaires. Défini par la procédure de calibrage hybride (<i>cf.</i> section I.2).
τ_{MSCi}	Taux de marge spécifique sur les consommations des ménages. Défini par la procédure de calibrage hybride (<i>cf.</i> section I.2).
τ_{MSGi}	Taux de marge spécifique sur les dépenses publiques. Défini par la procédure de calibrage hybride (<i>cf.</i> section I.2).
τ_{MSi}	Taux de marge spécifique sur les biens d'investissement. Défini par la procédure de calibrage hybride (<i>cf.</i> section I.2).
τ_{MSXi}	Taux de marge spécifique sur les exportations. Défini par la procédure de calibrage hybride (<i>cf.</i> section I.2).
τ_{Sh}	Taux d'épargne de la classe h . Calibré comme le ratio de l'épargne de la classe h à son RDB, données découlant du croisement de l'ensemble des principales sources

(TES, TEE, données de l'enquête Budget des Familles 2001 agrégées en m classes).

τ_{TVAi}

Taux de TVA à la consommation finale de bien i . Calibré sur les données du TES en traitant la TVA comme une simple taxe à la consommation prélevée indifféremment sur les consommations finales C , G et I ¹³.

Paramètres exogènes du modèle

β_{ih}	Part incompressible (besoin essentiel) de la consommation de la classe h en bien i . Calculée pour chaque bien i de sorte que le besoin incompressible de chaque classe h soit égal à 80% de la consommation réelle de la classe la moins consommatrice.
β_{ji}	Asymptote technique du coefficient technique α_{ji} .
β_{Ki}	Asymptote technique de l'intensité en capital du bien i .
β_{Li}	Asymptote technique de l'intensité en travail du bien i .
σ	Elasticité de substitution des parts variables des facteurs.
σ_{CRi}	Elasticité-revenu de la consommation des ménages de bien i . Produit d'une estimation économétrique sur données agrégées 1985-2006.
σ_{Cpi}	Elasticité-prix de la consommation des ménages de bien i . Produit d'une estimation économétrique sur données agrégées 1985-2006.
σ_{Mpi}	Elasticité du ratio des importations à la production domestique de bien i aux termes de l'échange
$\sigma_{\Phi i}$	Elasticité du coefficient de progrès technique du secteur i à sa consommation de capital fixe (dont l'évolution est prise comme approximation de celle de l'investissement cumulé)
$\sigma_{\Theta i}$	Elasticité du coefficient de rendements décroissants du secteur i à la production
σ_{Xpi}	Elasticité des exportations aux termes de l'échange
σ_{wu}	Elasticité du salaire net moyen (nominal ou réel, <i>cf. supra</i>) au taux de chômage
t_{CI}	Taxe carbone sur les émissions des consommations intermédiaire. Variable de contrôle.
t_{CF}	Taxe carbone sur les émissions des consommations des ménages. Variable de contrôle.
t_{REF}	Temps de développement de la réforme (années).

¹³ Dans le TES l'investissement est par convention valorisé à des prix intégrant la TVA. Le traitement de la TVA comme une taxe à la consommation masque certains effets distributifs entre productions, d'autant plus négligeables que le modèle est agrégé en biens. Elle est quasiment sans effet discernable sur les résultats macroéconomiques ou ceux distributifs concernant les ménages.

