

LES PROPRIÉTÉS DYNAMIQUES ET DE LONG TERME DU MODÈLE ThreeME UN CAHIER DE VARIANTES¹

Gaël Callonnec

ADEME, (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie), France

Gissela Landa Rivera, Paul Malliet, Aurélien Saussay

Sciences Po, OFCE, Paris, France

Frédéric Reynès

Sciences Po, OFCE, Paris, France et TNO, Netherlands Organization for Applied Scientific Research

ThreeME est un modèle macroéconomique d'équilibre général calculable multisectoriel d'inspiration néo-keynésienne, conçu pour évaluer les impacts macroéconomiques des politiques publiques, notamment énergétiques et environnementales. Cet article propose une analyse des propriétés dynamiques et de long terme du modèle ThreeME. Plusieurs variantes ont été conduites : une modification du prix du pétrole, des cotisations employeurs, de la TVA, des investissements publics ou encore l'introduction d'une taxe carbone. Pour chacune d'entre elles, nous montrons l'impact de la spécification de l'équation de salaire (en comparant les résultats simulés avec une courbe Wage Setting et de Phillips). Nous comparons aussi les résultats de ThreeME avec ceux du modèle MESANGE ainsi que deux versions de ThreeME (version standard et hybride).

Mots clés : modèle EGC néo-keynésien, modélisation macroéconomique, politique économique.

L'OFCE développe depuis 2008, en collaboration avec l'ADEME (Agence de l'Environnement et Maîtrise de l'Énergie), le modèle macroéconomique ThreeME (Multi-sector Macroeconomic Model for the Evaluation of Environmental and Energy policy, Modèle Macroéconomique Multisectoriel pour l'Évaluation des politiques Environnementales et Énergétiques), destiné usuelle-

1. Nous remercions les rapporteurs de la *Revue de l'OFCE* pour leurs suggestions. Les conclusions proposées ici n'engagent que les auteurs. Nous tenons à remercier également le soutien financier de l'ADEME concernant le développement du modèle ThreeME (subvention n° 1510C0039).

ment à l'évaluation pour la France des impacts des politiques énergétiques et environnementales. ThreeME étant avant tout un modèle macroéconomique multisectoriel, il peut aussi être utilisé pour l'étude de politiques économiques plus générales comme la modification de la fiscalité ou de certaines réglementations (e. g. augmentation du salaire minimum). Dans ThreeME, qui est décrit en détail dans Callonnec *et al.* (2013), l'économie est désagrégée en 37 secteurs économiques (dont 17 secteurs énergétiques et 5 secteurs de transport). Le modèle fournit donc des informations quantitatives détaillées relatives aux questions énergétiques. Le niveau fin du détail sectoriel et de la structure de la fiscalité permet de mettre en évidence l'hétérogénéité potentiellement forte des effets des politiques économiques selon les secteurs considérés. Comme exemples d'application du modèle ThreeME, on peut citer : l'impact de la création d'une taxe carbone (Callonnec *et al.*, 2011), les politiques de subvention d'investissements verts dans le bâtiment, l'automobile ou les transports publics, l'impact de la transition énergétique (Callonnec *et al.*, 2013), comme la hausse de la part des énergies renouvelables ou la réduction de la part de la production d'électricité d'origine nucléaire, l'impact macroéconomique de la rénovation énergétique, la prospective macroéconomique à 10 ans estimée à partir d'enquêtes sectorielles.

ThreeME est un Modèle d'Équilibre Général Calculable (MEGC) d'inspiration néo-keynésienne. Il reprend donc les caractéristiques standard des modèles macroéconomiques néo-keynésiens. En particulier, il tient compte de l'inertie des processus d'ajustement des prix et des quantités. Les prix sont déterminés dans un cadre de concurrence imparfaite par maximisation du profit à long terme : le prix de chaque bien s'ajuste lentement à un prix désiré qui correspond à un taux de marge sur les coûts unitaires de production. Les salaires sont déterminés soit par une courbe de Phillips soit par une courbe Wage Setting (WS). Du fait de coûts d'ajustement, la demande de facteurs de production (capital, travail, consommations intermédiaires énergétiques et non-énergétiques) s'ajuste aussi progressivement au niveau désiré. Cette dernière est celle qui minimise les coûts de production pour une demande anticipée donnée. En cohérence avec la théorie keynésienne, le niveau de l'offre (production et importations) est donc déterminé par la demande. Conformément aux observations empiriques, les dépenses de

consommation finale s'ajustent progressivement vers un niveau désiré qui est déterminé par la cible de taux d'épargne des ménages.

À la différence de certains modèles uni-sectoriels d'inspiration néo-keynésienne de l'économie française, tels E-MOD (Chauvin *et al.*, 2002) ou MESANGE (Klein et Simon, 2010), ThreeME n'est pas un modèle à proprement parler économétrique puisque ces équations ne sont pas directement estimées économétriquement. Toutefois, les délais d'ajustement et le niveau des élasticités sont calibrés sur des estimations de la littérature économétrique. Par ailleurs, sa périodicité est annuelle alors qu'elle est trimestrielle pour des modèles tels que E-MOD ou MESANGE.

Comparé à la plupart des MEGC (e. g. Bovenberg et Mooij, 1994 ; Shoven et Whalley, 1994) qui postulent une parfaite flexibilité des prix et des quantités, ThreeME a pour objectif de représenter de manière plus réaliste le fonctionnement de l'économie en tenant compte explicitement de l'ajustement lent des prix et des quantités effectifs à leur niveau optimal. Le taux d'intérêt n'équilibre pas l'épargne et l'investissement. Il est fixé par les autorités monétaires (règle de Taylor). Dans ce cadre, l'offre de crédit est positivement corrélée à l'investissement qui lui-même dépend de la demande. Le stock de capital évolue de manière endogène. Tout cela autorise l'apparition d'équilibres de sous-emploi permanents ou transitoires (e. g. Benassy, 1975 ; Annicchiarico et Di Dio, 2015). Par rapport à la plupart des modèles macroéconomiques d'inspiration néo-keynésienne de l'économie française (E-MOD, MESANGE), ThreeME a l'avantage d'être multisectoriel à un niveau relativement détaillé. Cela est important pour l'analyse de toute politique économique ayant pour objectif de faire évoluer les comportements de production et de consommation, en modifiant les prix relatifs entre secteurs et produits, comme la fiscalité carbone.

Deux versions de ThreeME peuvent être simulées. La première est dite « standard » dans le sens où elle retient l'approche standard de la modélisation des comportements de consommation pour tous les biens. Les ménages maximisent une fonction d'utilité, croissante des quantités consommées de chaque bien, sous une contrainte de revenu. La consommation de chaque bien suit alors plus ou moins proportionnellement les évolutions du revenu en fonction des arbitrages entre consommation et épargne et entre biens de consommation. Dans la version dite « hybride », la quantité

d'énergie consommée n'est pas liée directement au revenu des ménages. Elle n'est pas désirée pour elle-même. Elle est assimilée à un bien complémentaire. Sa consommation dépend de l'évolution et de la nature du stock de capital (véhicules, immeubles, biens d'équipement). Par exemple, l'énergie utilisée pour les besoins du chauffage dépend du nombre de bâtiments existants et de la classe énergétique à laquelle ils appartiennent. Cette hypothèse empruntée aux modèles énergétiques « bottom-up » développés par les ingénieurs est plus réaliste que celle des MEGC (dit « top-down ») et reprise dans la version standard. En effet, elle permet de tenir compte du niveau de saturation, de la complémentarité de l'énergie avec d'autres biens (voitures, logements), mais aussi d'endogénéiser les mécanismes d'efficacité énergétique observés dans la consommation des ménages.

Le présent article analyse les propriétés dynamiques et de long terme du modèle ThreeME *via* l'analyse d'un cahier de variantes standard : les chocs simulés sont une hausse du prix du pétrole, une baisse des cotisations employeurs, une hausse de la TVA, une hausse des investissements publics et l'introduction d'une taxe carbone. Ces variantes sont standard et sont souvent retenues pour analyser et comparer les propriétés des modèles macroéconomiques (e. g. *Economie&Prévision*, 1998). Elles sont pertinentes pour analyser les propriétés générales des modèles mais aussi pour étudier les problèmes énergétiques et environnementaux. En effet, la réduction des cotisations employeurs ou la hausse des investissements publics en infrastructures de transport sont souvent citées comme des mesures d'accompagnement nécessaires de la fiscalité carbone. Pour bien comprendre l'effet global, il est important d'analyser dans un premier temps l'effet de chaque mesure isolée.

Cet exercice aide à comprendre les principaux mécanismes sous-jacents aux résultats obtenus par le modèle. Il est aussi utile pour mettre en évidence le rôle crucial des hypothèses de calibration relatives aux valeurs des élasticités mais aussi celui de la spécification de certaines équations (comme la formation des salaires ou la modélisation des comportements de consommation énergétique des ménages).

La section 1 fournit une courte description de ThreeME. En particulier, elle donne la spécification des principales équations du modèle de la version standard (sous-sections 1.1 à 1.7). Les modifi-

cations-clés apportées par la version hybride sont présentées dans la sous-section 1.8. Ensuite, les propriétés dynamiques et de long terme du modèle sont analysées (section 2) et les hypothèses-clés sous-jacentes aux résultats sont mises en avant. Les sous-sections 2.1 à 2.5 étudient les résultats dans le cas de la version standard. La sous-section 2.6 compare les résultats du modèle ThreeME standard avec ceux du modèle MESANGE dans le cas d'une hausse du prix du pétrole et une baisse des cotisations employeurs. La sous-section 2.7 compare les résultats obtenus avec les versions standard et hybride de ThreeME dans le cas d'une hausse du prix du pétrole et du gaz. La section 3 conclut.

1. ThreeME : une courte description

ThreeME est un modèle générique national en accès libre (*Open source*)². Initialement développé pour nourrir le débat sur des questions énergétiques, environnementales et climatiques en France, ThreeME est maintenant appliqué à d'autres pays tels que le Mexique (Landa Rivera *et al.*, 2016), l'Indonésie et les Pays-Bas. Conçu notamment pour évaluer les impacts économiques de politiques environnementales et énergétiques à moyen et long terme au niveau macroéconomique et sectoriel, ThreeME combine différentes caractéristiques (Callonnec *et al.*, 2013) :

- sa désagrégation sectorielle permet l'analyse des effets du transfert d'activité d'un secteur à un autre, notamment en termes d'emplois, d'investissement, de consommation d'énergie et de commerce extérieur ;
- la désagrégation énergétique permet l'analyse des comportements en matière de production et de consommation d'énergie. Les secteurs d'activité peuvent arbitrer entre différents investissements énergétiques : substitution entre capital, travail et énergie quand les prix relatifs changent, substitution entre sources d'énergie. Les ménages peuvent substituer entre sources énergétiques, entre modes de transport et entre types de biens ou services ;
- ThreeME est un MEGC. Plusieurs définitions d'un MEGC coexistent dans la littérature. La plus commune renvoie à un

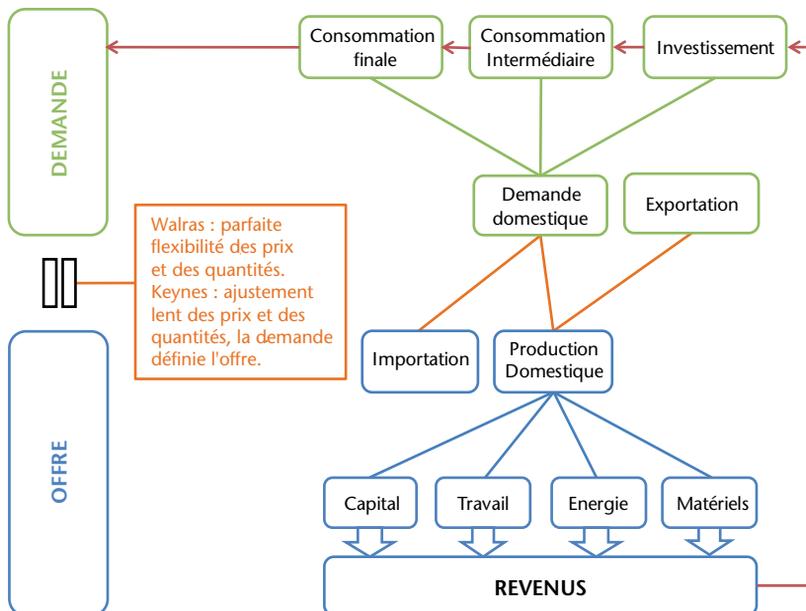
2. La version du modèle utilisée dans la présente étude est accessible sur le site de l'OFCE.

modèle faisant l'hypothèse introduite par Walras où les prix équilibrent instantanément l'offre et la demande sur tous les marchés : « Market clearing assumption » (Dixon et Jorgenson, 2013 ; Hosoe *et al.*, 2010 ; Shoven et Whalley, 1994). Nous retenons une définition plus large en définissant un modèle d'équilibre général par opposition à un modèle en équilibre partiel. Selon cette définition, un MEGC est un modèle macroéconomique qui prend en compte l'interaction et les effets de retour entre l'offre et la demande (voir graphique 1). Plusieurs règles de bouclage (« closing rule ») sont possibles. La plus commune est la règle de bouclage walrasienne où la parfaite flexibilité des prix et des quantités (facteur de production, consommation, etc.) assure l'équilibre entre l'offre et la demande. Des exemples de MEGC adoptant cette hypothèse sont ENV-Linkages (Chateau *et al.*, 2014) de l'OCDE, GEM-E3 (Capros *et al.*, 2013) et GTAP (Center for Global Trade Analysis – GTAP, 2014). Selon la règle de bouclage keynésienne, les prix sont rigides et n'équilibrent pas (du moins instantanément) l'offre et la demande. En cohérence avec la théorie keynésienne, l'égalité entre l'offre et la demande est satisfaite en supposant que la demande détermine l'offre. En d'autres termes, la loi de Say n'est pas respectée : ce ne sont pas les stocks de facteurs de production qui déterminent la demande, mais le contraire. Outre ThreeME, d'autres exemples de modèles adoptant une règle de bouclage keynésienne incluent les modèles économétriques tels que E-MOD, MESANGE, E3ME (Cambridge Econometrics, 2014), GINFORS (Lutz *et al.*, 2010), NEMESIS (ERASME, n.d.-b) ou les modèles de type DSGE (Dynamic Stochastic General Equilibrium) (e. g. Smets et Wouters, 2003) ;

- comparé aux modèles énergétiques *bottom-up* en équilibre partiel comme MARKAL (Fishbone et Abilock, 1981) or LEAP (Heaps, 2008), ThreeME va au-delà d'une simple description de la dimension sectorielle et technologique, en la liant au système économique dans son ensemble ;
- ThreeME est un modèle néokeynésien. Comparé aux MEGC standard walrasien, les prix ne s'ajustent pas instantanément. Le modèle est dynamique, les prix et les quantités s'ajustent lentement. Cela a l'avantage de permettre des

situations d'équilibre de sous-emploi entre l'offre et la demande, particulièrement la présence du chômage involontaire. Ce cadre théorique est mieux adapté pour l'analyse des politiques économiques car il fournit des informations concernant la phase de transition des effets d'une politique (et pas seulement une analyse de long terme).

Graphique 1. Architecture d'un MEGC



Source : ThreeME, construction propre.

Par rapport à la plupart des modèles macroéconomiques d'inspiration néo-keynésienne de l'économie française, ThreeME a l'avantage d'être multisectoriel à un niveau relativement détaillé. Il dispose d'une segmentation en 37 secteurs économiques (voir tableau 1) dont 17 secteurs énergétiques et 5 secteurs de transport (transports ferroviaire, routier de voyageurs et de marchandises, par eau et aérien). Le secteur pétrolier est subdivisé en deux, pétrole et biocarburant ; celui de la production et distribution d'électricité en 8 technologies : nucléaire, centrale au fioul, centrale combinée gaz, centrale au charbon, éolien, solaire, hydraulique et cogénération. Enfin la production et distribution de gaz et de chaleur est assurée par 6 secteurs : gaz naturel, bois, biogaz, UIOM (Usine

d'Incinération des Ordures Ménagères), géothermie et cogénération. Ce niveau de détail est important pour l'analyse de toute politique économique ayant pour objectif de faire évoluer les comportements de production et de consommation, en modifiant les prix relatifs entre secteurs et produits.

Tableau 1. Désagrégation sectorielle du modèle ThreeME, répartition de la production par secteur

	Secteurs	PROD (%)	Secteurs	PROD (%)
INDUSTRIE	1. Agriculture, sylviculture et pêche	2,4	21. Extraction et agglomération de la houille (Charbon)	0,001
	2. Industrie agro-alimentaire	3,7	22. Raffinage et distribution de pétrole	
	3. Automobile	2,7	1. Pétrole	1,5
	4. Fabrication de verre et d'articles en verre	0,2	2. Biocarburants	0,0
	5. Fabrication de produits céramiques	0,6	23. Production et distribution de gaz	
	6. Papier et carton	0,6	1. Nucléaire	1,1
	7. Industrie chimique minérale	0,2	2. Centrale fioul	0,0
	8. Industrie chimique organique	0,7	3. Centrale combinée gaz	0,1
	9. Transformation des matières plastiques	0,8	4. Centrale charbon	0,1
	10. Sidérurgie et première transformation de métaux ferreux	0,7	5. Eolien	0,0
	11. Production de métaux non ferreux	0,4	6. PV	0,0
	12. Autres industries	13,5	7. Hydraulique	0,2
	13. BTP	7,0	8. Cogénération	0,0
TRANSPORT	14. Transports ferroviaires	0,3	24. Production et distribution de gaz	
	15. Transport routier de voyageurs	0,5	1. Gaz naturel	0,6
	16. Transport routier (ou par conduites) de marchandises	1,6	2. Bois énergie	0,1
	17. Transports par eau	0,4	3. Biogaz	0,0
	18. Transports aériens	0,6	4. UIOM	0,0
SERVICE	19. Services marchands	48,0	5. Géothermie	0,0
	20. Services non marchands	11,5	6. Cogénération	0,0

Source : INSEE, TES 2006. Construction propre des auteurs.

Comme tout MEGC, ThreeME comporte essentiellement deux types d'équations : des équations comptables et des équations de

comportement. Les équations comptables sont des identités comptables. Elles ne traduisent pas un comportement économique et ne sont donc pas dérivées d'une règle d'optimisation économique. Elles permettent de reproduire la contrainte d'équilibre comptable entre l'offre et la demande. Les équations comptables permettent de calculer des grandeurs économiques tels que le PIB, la consommation, l'investissement, etc., ainsi que les indices de prix correspondant. Afin d'obtenir des indices des prix, chaque variable est définie en valeur et en volume. Par définition, les indices de prix sont calculés comme des moyennes de prix pondérées par des volumes. Tous les prix sont fixés à l'unité pour l'année de base. L'ensemble des équations comptables de ThreeME est donné dans Callonnec *et al.* (2013). Dans la suite de cette section, nous revenons sur les principales équations de comportement.

1.1. Spécification des mécanismes d'ajustement

Contrairement aux modèles d'inspiration walrasienne qui postulent une égalité entre l'offre et la demande grâce à une parfaite flexibilité des prix et des quantités, ThreeME représente de manière plus réaliste le fonctionnement de l'économie en tenant compte explicitement de l'ajustement lent des prix et des quantités (facteurs de production, consommation). Dans ce cadre néokeynésien, des équilibres de sous-emploi permanents ou transitoires sont possibles et l'offre est déterminée par la demande.

ThreeME suppose que les niveaux effectifs des prix et des quantités s'ajustent progressivement à leur niveau notionnel³. Le niveau notionnel correspond au niveau optimal, désiré ou cible que l'agent économique en question (l'entreprise pour les prix et la demande de facteurs de production, le ménage pour la consommation, la Banque centrale pour le taux d'intérêt, etc.) choisirait en l'absence de contraintes d'ajustement. Ces contraintes sont principalement liées à des coûts d'ajustement, à des limites physiques ou temporelles et aux incertitudes. Formellement, nous supposons que le processus d'ajustement et des anticipations pour les prix et les quantités sont représentés par les équations suivantes :

3. Le terme de « notionnel » a été introduit par la théorie du déséquilibre (e. g. Benassy, 1975, 1976 ; Malinvaud, 1977, 1983) pour distinguer les grandeurs effectives des grandeurs optimales (notionnelles).

$$\ln(X_t) = \lambda_0^X * \ln(X_t^n) + (1 - \lambda_0^X) * (\ln(X_{t-1}) + \Delta \ln(X_t^e)) \quad (1)$$

$$\Delta \ln(X_t^e) = \lambda_1^X * \Delta \ln(X_{t-1}^e) + \lambda_2^X * \Delta \ln(X_{t-1}) + \lambda_3^X * \Delta \ln(X_t^n) \quad (2)$$

Où X_t est la valeur effective d'une variable donnée (e. g. le prix à la production, le travail, le capital, etc.), X_t^n est son niveau notionnel, X_t^e sa valeur anticipée à la période t et λ_i^X représente les différents paramètres d'ajustement (avec $\lambda_1^X + \lambda_2^X + \lambda_3^X = 1$).

L'équation (1) suppose un processus d'ajustement géométrique. La prise en compte des anticipations garantit que les variables effectives convergent vers les niveaux désirés à long terme. L'équation (2) suppose que les anticipations sont adaptatives (« backward-looking »). Notons que les équations (1) et (2) peuvent être reformulées comme un modèle à correction d'erreur utilisé dans les estimations économétriques afin de tenir compte du caractère non-stationnaire de certaines variables :

$$\Delta \ln(X_t) = \alpha_1 * \Delta \ln(X_{t-1}) + \alpha_2 * \Delta \ln(X_t^n) - \alpha_3 * \ln\left(\frac{X_{t-1}}{X_{t-1}^n}\right).$$

Pour cela, les contraintes suivantes doivent être appliquées :

$$\lambda_0^X = \alpha_3, \lambda_1^X = 0, \lambda_2^X = \alpha_1/(1 - \alpha_3), \lambda_3^X = (\alpha_2 - \alpha_3)/(1 - \alpha_3).$$

Notons que ThreeME n'est pas à proprement parler un modèle économétrique puisque les délais d'ajustement ainsi que le niveau des élasticités sont calibrés et non directement estimés. Toutefois, le paramétrage reprend les résultats d'estimations économétriques de la littérature. Ainsi les coefficients ci-dessus définissant les vitesses d'ajustement ont été calibrés de façon à reproduire les délais d'ajustement obtenus par les modèles économétriques de l'économie française MESANGE et E-MOD. Cet exercice a été réalisé pour la plupart des équations de comportement : par exemple, les équations de demande de facteurs de production, de consommation, de prix et de salaires.

Nous supposons également que les effets de substitution ($SUBST_X$) s'ajustent lentement aux effets de substitution notionnels ($SUBST_X^n$) :

$$SUBST_X_t = \lambda_4^X * SUBST_X_t^n + (1 - \lambda_4^X) * SUBST_X_{t-1} \quad (3)$$

Les trois équations ci-dessus représentent un riche ensemble d'ajustements puisqu'elles intègrent différents types de rigidité (sur les prix et les quantités, sur les anticipations et sur les mécanismes

de substitution). À titre d'illustration, nous présentons la spécification complète de la demande de travail (L). Par simplicité, l'indice sectoriel est omis. La demande de travail notionnelle (L^n) est déduite par minimisation des coûts de production (voir section 1.2). Elle dépend positivement du niveau de la production (Y), négativement du taux de progrès technique autonome sur le facteur travail ($PROG_L$) et d'un élément regroupant l'ensemble des phénomènes de substitution avec les autres facteurs de production ($SUBST_L$) :

$$\Delta \ln(L_t^n) = \Delta \ln(Y_t) - \Delta \ln(PROG_L_t) + \Delta SUBST_L_t \quad (4)$$

Nous introduisons une distinction entre les effets de substitution effective et notionnelle pour tenir compte du fait que la demande de travail réagit généralement plus rapidement à la variation du niveau de la production qu'aux phénomènes de substitution : alors qu'il est « physiquement » nécessaire d'augmenter l'emploi pour faire face à une hausse de la production, les substitutions impliquent des modifications de la structure de production dont la mise en œuvre prend plus de temps. La substitution effective s'ajuste donc progressivement à la substitution notionnelle ($SUBST_L^n$) qui dépend des prix relatifs entre les facteurs de productions :

$$\begin{aligned} \Delta SUBST_L_t^n = & -\eta^{LK} \varphi_{t-1}^K \Delta \ln(C_t^L / C_t^K) - \eta^{LE} \varphi_{t-1}^E \Delta \ln(C_t^L / C_t^E) \\ & - \eta^{LMat} \varphi_{t-1}^{Mat} \Delta \ln(C_t^L / C_t^{Mat}) \end{aligned} \quad (5)$$

Où η^{LK} , η^{LE} , η^{LMat} , sont les élasticités de substitution entre le travail et les autres facteurs de production, respectivement le capital, l'énergie et les matériaux (c'est-à-dire les consommations intermédiaires non-énergétiques). φ^K , φ^E , φ^{Mat} sont respectivement les parts du capital, de l'énergie et des matériaux dans les coûts de production. C^K , C^L , C^E , C^{Mat} sont respectivement les coûts unitaires de production du capital, du travail, de l'énergie et des matériaux. La section suivante donne plus d'information sur la dérivation des demandes de facteurs.

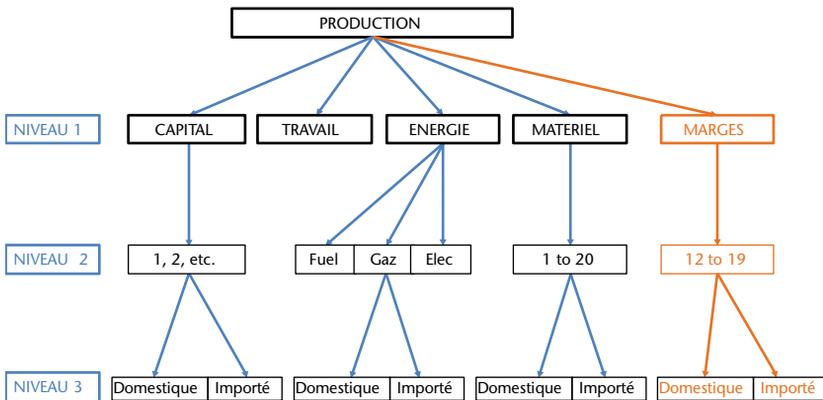
Enfin, les mécanismes d'ajustement étant définis selon les équations (1), (2) et (3), on obtient les trois relations suivantes :

$$\begin{aligned} \ln(L_t) &= \lambda_0^L * \ln(L_t^n) + (1 - \lambda_0^L) * (\ln(L_{t-1}) + \Delta \ln(L_t^e)) \\ \Delta \ln(L_t^e) &= \lambda_1^L * \Delta \ln(L_{t-1}^e) + \lambda_2^L * \Delta \ln(L_{t-1}) + \lambda_3^L * \Delta \ln(L_t^n) \quad (6) \\ SUBST_L_t &= \lambda_4^L * SUBST_L_t^n + (1 - \lambda_4^L) * SUBST_L_{t-1} \end{aligned}$$

1.2. La fonction de production et la demande de facteurs de production

La structure de production est décomposée en trois niveaux (voir graphique 2). Le premier suppose une fonction de production avec 4 facteurs de production, dite KLEM (capital, travail, énergie et matériel). Il intègre aussi un cinquième élément : les marges commerciales et de transport mais qui ne sont pas *stricto sensu* des facteurs de production puisqu'elles interviennent après le processus de production. Le second niveau correspond à la décomposition de l'investissement et de l'énergie par type de bien et/ou de source d'énergie selon le cas considéré. Dans le troisième niveau, chaque facteur de production peut soit être importé, soit produit localement. Les équations de demande de facteurs sont déduites d'un comportement de minimisation des coûts de production des entreprises. Nous supposons une fonction de production à rendements d'échelle constants plus générale que la fonction CES (Constant Elasticity of Substitution) dans la mesure où les élasticités de substitution peuvent différer entre les différents couples de facteurs de production (Reynès, 2011). Nous avons utilisé des élasticités de substitution assez conservatrices dans le sens où elles se situent dans la fourchette basse de la littérature. Elles sont présentées par niveau dans le tableau 2. Les élasticités entre capital et énergie ont été adaptées à partir des estimations faites pour le modèle NEMESIS (Boitier *et al.*, 2011).

Graphique 2. Structure de production



Source : ThreeME, construction propre.

Tableau 2. Valeurs des élasticités de substitution

Description	Valeur
Niveau 1: élasticités KLEM	
Entre Capital et Travail pour les secteurs non énergétiques	0,5
Entre Capital et Travail pour les secteurs énergétiques	0,3
Entre Capital et Energie :	
Agriculture et industrie agro-alimentaire	0,708
Automobile	0,050
Fabrication de verre et fabrication de produits céramiques	0,317
Papier et carton	0,157
Industrie chimique minérale et industrie chimique organique	0,862
Transformation de matières plastiques	0,093
Sidérurgie	0,609
Autres industries	0,760
BTP	0,306
Secteurs du transport	0,2
Services marchands et non marchands	0,4
Extraction et agglomération de la houille (charbon)	0,073
Secteurs énergétiques	0,0
Entre Travail et Energie dans les secteurs non énergétiques	0,1
Entre Travail et Energie dans les secteurs énergétiques	0,0
Entre Capital et Consommation Intermédiaire (CI)	0,0
Entre Travail et CI	0,15
Entre Energie et CI dans les secteurs non énergétiques	0,1
Entre Energie et CI dans les secteurs énergétiques	0,0
Niveau 2	
Entre type d'énergie dans les secteurs non énergétiques	entre 0,0 et 0,6
Entre type d'énergie dans les secteurs énergétiques	0,0
Entre Marge de Transport	0,3
Entre Biens d'investissement et Consommation intermédiaire	0,8
Niveau 3	
Élasticité de substitution d'Armington entre Biens domestiques et Biens importés	0,8
Entre Biens de consommation finale	0,5
Élasticité d'exportations	0,6

Source : ThreeME.

Le programme de minimisation des coûts de production aboutit aux équations de demande de facteurs notionnelles suivantes. Dans ThreeME, chaque activité économique est spécifiée de la sorte, mais par souci de simplicité l'indice sectoriel est ici omis :

$$\Delta \ln(FP_{j,t}^n) = \Delta \ln(Y_t) - \Delta \ln(PROG_FP_{j,t}) + \Delta SUBST_FP_{j,t} \quad (7)$$

$$\Delta SUBST_FP_{j,t}^n = - \sum_{\substack{j'=1 \\ j' \neq j}}^J \eta_{j,j'} \varphi_{j',t-1} \Delta \ln(C_{j',t}^{FP} / C_{j,t}^{FP}) \quad (8)$$

$$\text{avec} \quad \varphi_{j,t-1} = \frac{C_{j,t}^{FP} * FP_{j,t-1}}{\sum_j C_{j,t}^{FP} * FP_{j,t-1}} \quad \text{et} \quad j = \{ K, L, E, M \} \quad (9)$$

Où FP_j^m représente la demande notionnelle des facteurs j (KLEM), $\eta_{j,j'}$ l'élasticité de substitution entre les couples de facteurs de production j et j' , φ_j la part de la valeur des facteurs j , $PROG_FP_{j,t}$ le progrès technique du facteur de production j , C_j^{FP} le coût/prix du facteur j et Y la production du secteur considéré.

Conformément aux données de la comptabilité nationale, ThreeME suppose que chaque bien peut être produit par plusieurs secteurs, par exemple l'électricité peut être produite par plusieurs secteurs comme celui du nucléaire ou de l'éolien. La production de chaque secteur est définie par les équations suivantes :

$$Y_{c,a} = \varphi_{c,a} Y Q_c \quad (10)$$

$$Y_a = \sum_c Y_{a,c} \quad (11)$$

Où $Y Q_c$ est la production domestique agrégée du bien c . Elle est déterminée par la demande (consommation intermédiaire et finale, investissement, dépense publique, exportation et variation de stock). $\varphi_{c,a}$ est donc la part du bien c produite par le secteur a (avec $\sum_a \varphi_{c,a} = 1$) et Y_a est la production agrégée du secteur a .

1.3. Équation d'investissement et de capital

L'investissement dans ThreeME dépend de la production anticipée, de sa dynamique passée, de phénomènes de substitution et d'un mécanisme de correction qui garantit que les entreprises atteignent leur niveau de stock de capital notionnel à long terme. Le stock de capital est déduit de l'investissement selon l'équation standard d'accumulation du capital :

$$\begin{aligned} \Delta \ln(I A_t) &= \theta_1^{IA} * \Delta \ln(I A_{t-1}) + \theta_2^{IA} * \Delta \ln(Y_t^e) \\ &+ \theta_3^{IA} (\ln(K_{t-1}^n) - \ln(K_{t-1})) + \Delta SUBST_K_t \end{aligned} \quad (12)$$

$$K_t = (1 - \delta^K) K_{t-1} + I A_t$$

Où IA est l'investissement, Y^e la production anticipée, K et K^n le stock de capital effectif et notionnel, $SUBST_K$ une variable regroupant les phénomènes de substitution, et δ^K le taux de dépréciation du capital. Par ailleurs, nous imposons la contrainte $\theta_1^{IA} + \theta_2^{IA} = 1$ afin de garantir l'existence d'un sentier de croissance équilibré.

Cette spécification constitue un compromis entre la dynamique de court terme observée empiriquement (Oliner *et al.*, 1995 ; Ducoudré *et al.*, 2015) et la cohérence du modèle à long terme. A l'instar des modèles E-MOD et MESANGE, il est commun d'estimer une équation d'investissement plutôt qu'une équation de stock de capital. Cela permet de mieux représenter la dynamique de l'investissement à court terme. En particulier cela évite les phénomènes de destruction du capital (investissement négatif) qui sont en pratique rares, les entreprises préférant généralement attendre la dépréciation technique de leur capital installé. À la différence d'E-MOD ou de MESANGE, nous supposons de plus que l'investissement dépend de l'écart entre le stock de capital effectif et notionnel. Ce terme garantit que le stock de capital effectif converge à long terme vers son niveau notionnel. Le modèle est alors cohérent à long terme avec la fonction de production qui lie les quantités produites au stock de capital (et non avec son flux).

1.4. Équation de salaire

La spécification de l'équation de salaire est controversée depuis la remise en cause de la courbe de Phillips par Layard *et al.* (1991) qui proposent de la remplacer par la courbe Wage-Setting (WS). Alors que la courbe de Phillips établit une relation entre le taux de croissance des salaires et le niveau du taux de chômage, la courbe WS établit une relation entre le niveau des salaires et le niveau du taux de chômage. Plusieurs études ont montré que les arguments théoriques et les estimations empiriques permettent difficilement de trancher entre les deux spécifications (e. g. Le Bihan et Sterdyniak, 1998 ; Blanchard et Katz, 1999 ; Heyer *et al.*, 2007). Pour autant, cette différence de spécification a des implications importantes sur la définition du taux de chômage d'équilibre (NAIRU) et donc sur la dynamique inflationniste et les propriétés de long terme d'un modèle macroéconomique (e. g. L'Horty et Thibault, 1998 ; Chagny *et al.*, 2002). Dans ThreeME, nous retenons une spécification générale qui englobe les courbes de Phillips et WS. Elle suppose que le salaire nominal notionnel (W_t^n) dépend positivement du prix à la consommation anticipé (P_t^e) et du progrès technique du travail ($PROG_L_t$) et négativement du taux du chômage (U_t) :

$$\begin{aligned} \Delta \ln(W_t^n) = & \rho_1^W + \rho_2^W * \Delta \ln(P_t^e) + \rho_3^W * \Delta \ln(PROG_L_t) \\ & - \rho_4^W U_t - \rho_5^W \Delta U_t \end{aligned} \quad (13)$$

Cette relation sera identique soit à la Courbe de Phillips, soit à la WS selon la valeur des coefficients retenue (Heyer *et al.*, 2007 ; Reynès, 2010). La courbe de Phillips correspond au cas où $\rho_4^w > 0$. Une valeur de $\rho_5^w > 0$ traduit des phénomènes d'hystérèse ou de persistance : les hausses de salaires ne dépendent pas seulement du niveau de l'emploi mais aussi de son évolution. La courbe WS suppose $\rho_4^w = 0$, ce qui peut être interprété comme un phénomène d'hystérèse total. Pour que le modèle ait un sentier de croissance équilibré à long terme, la courbe WS doit par ailleurs imposer les contraintes retenues par Layard *et al.* (2005) : une indexation unitaire des salaires sur les prix et la productivité ($\rho_2^w = \rho_3^w = 1$) et $\rho_1^w = 0$.

1.5. Équation de consommation

Dans la version standard du modèle, les décisions de consommation sont modélisées à travers une fonction d'utilité de type *Linear Expenditure System* (LES) généralisée au cas d'une élasticité de substitution entre les biens non-unitaires par Brown et Heien (1972). Les dépenses des ménages pour chaque bien évoluent (plus ou moins) proportionnellement avec leur revenu :

$$(EXP_c^n - NEXP_c).PEXP_c = \beta_c^{EXP} \left[(1 - MPS).DISPINC_VAL - \sum_c PEXP_c * NEXP_c \right]$$

$$\text{Avec } \sum_c \beta_c^{EXP} = 1 \quad (14)$$

Où $EXP_{c,h}^n$ correspond au volume de la consommation (dépense) notionnelle du bien c et $PEXP_c$ à son prix. $NEXP_c$ est le volume de dépense incompressible en bien c , $DISPINC_VAL$ est le revenu disponible des ménages et MPS leur propension marginale à épargner.

Dans le cas où les dépenses incompressibles sont nulles ($NEXP_c = 0$), les ménages ont pour objectif d'affecter une part β_c^{EXP} de leurs dépenses totales (en valeur), $(1 - MPS).DISPINC_VAL$, au bien c . Cette part est constante si l'élasticité de substitution entre les biens est unitaire (hypothèse de Cobb-Douglas). Dans ce cas (fonction d'utilité Cobb-Douglas sans dépense incompressible), les dépenses évoluent exactement proportionnellement au revenu. Dans le cas d'une fonction CES où l'élasticité de substitution est η^{LES_CES} , la propension marginale à dépenser varie en fonction des prix relatifs selon la spécification suivante :

$$\Delta \beta_{c,t}^{EXP} = (1 - \eta^{LES_CES}) * \Delta \frac{PEXP_{c,t}}{PEXP_t^{CES}} \quad (15)$$

$$PEXP_t^{CES} = \left(\sum_c \beta_{c,0}^{EXP} * PEXP_{c,t}^{(1-\eta^{LES_CES})} \right)^{\frac{1}{1-\eta^{LES_CES}}} \quad (16)$$

1.6. Équations des prix et du taux de marge

Le prix de production pour chaque secteur est défini en appliquant un taux de marge sur les coûts unitaires de production (travail, capital, énergie et autres consommations intermédiaires) :

$$PY_t^n = CU_t * (1 + TMD_t) \quad (17)$$

$$\Delta \ln(1 + TM_t^n) = \sigma^{TM} * (\Delta \ln(Y_t) - \Delta \ln(Y_{t-1})) \quad (18)$$

$$TMD_t = \lambda^{TM} * TM_t^n + (1 - \lambda^{TM}) * TM_{t-1} \quad (19)$$

Où PY_t^n est le prix notionnel, CU_t le coût unitaire de production et Y_t le niveau de la production. TMD_t et TM_t^n sont respectivement les taux de marge désiré et notionnel.

L'équation du prix notionnel relève d'un comportement économique : en supposant que la demande adressée à une entreprise est une fonction négative de son prix, on démontre facilement que le prix optimal correspond à un taux de marge sur le coût marginal de production. L'équation de taux de marge suppose que les rendements d'échelle sont décroissants à court terme. Dès lors, une hausse de la production non-anticipée entraîne une hausse du coût marginal de production et donc du prix notionnel.

Les autres prix sont définis de manière comptable à partir du prix à la production. Le prix domestique du bien c est une moyenne pondérée des prix de production des activités (indicées par a) produisant ce bien. Par exemple, le prix de l'électricité est une moyenne pondérée des prix des secteurs producteurs d'électricité. Le prix payé par l'utilisateur final (consommateur, gouvernement, secteur, reste de monde) intègre en plus les marges commerciales et de transport ainsi que les taxes nettes des subventions. Combiné aux prix des imports, nous obtenons le prix moyen pour chaque bien et service payé par chaque utilisateur final.

1.7. Équations du commerce extérieur

Les exportations sont déterminées par la demande externe adressée aux produits domestiques et le ratio entre le prix des exportations et les prix mondiaux :

$$\begin{aligned} \Delta \ln(X_{c,t}) &= \Delta \ln(WD_{c,t}) + \Delta SUBST_X_{c,t} \\ \Delta SUBST_X_{c,t}^n &= -\eta^X * \Delta \ln(P_{c,t}^X / P_{c,t}^W / TC_t) \end{aligned} \quad (20)$$

Où $WD_{c,t}$ est la demande mondiale, $P_{c,t}^W$ est son prix. Le prix des exportations, $P_{c,t}^X$, qui dépend du prix à la production, reflète la compétitivité-prix des produits domestiques. Aucun comportement de marge particulier aux produits exportés n'est postulé. TC_t est le taux de change, η^X est l'élasticité-prix (supposée constante).

Nous supposons une imparfaite substitution entre les produits domestiques et les produits importés (Armington, 1969) the country (or region. La demande des produits domestiques et importés s'écrit :

$$\begin{aligned} \Delta \ln(A_{c,t}^D) &= \Delta \ln(A_{c,t}) + \Delta SUBST_AD_{c,t} \\ \Delta SUBST_AD_{c,t}^n &= \eta_c^A * \Delta \ln(P_{c,t}^{AD} / P_{c,t}^{AM}) * \frac{P_{c,t-1}^{AM} * A_{c,t-1}^M}{P_{c,t-1}^A * A_{c,t-1}^D} \\ A_{c,t}^M &= A_{c,t} - A_{c,t}^D \end{aligned} \quad (21)$$

Où $A_{c,t}$ représente la demande pour chaque type d'utilisation (consommation intermédiaire, investissement, consommation, dépense publique, exportation, etc.), $P_{c,t}^A$ est le prix. $A_{c,t}^M$ et $A_{c,t}^D$ sont les importations et le produit domestique demandés par type d'utilisation A , $P_{c,t}^{AM}$ et $P_{c,t}^{AD}$ sont leur prix respectif. Nous supposons que les producteurs étrangers ajustent leur marge en fonction des évolutions des prix domestiques. Les élasticités de substitution η_c^A par type d'utilisation A d'un bien donné c peuvent potentiellement être différentes, ce qui autorise un degré de flexibilité important.

1.8. Principales équations du bloc hybride

La représentation standard du comportement d'optimisation du consommateur, intégrée dans la plupart des MEGC « top-down », suppose que la consommation d'énergie fournit une utilité directe. Elle est d'ailleurs intégrée dans une fonction d'utilité au même niveau que les autres biens. Cette hypothèse conduit à ce que la

consommation d'énergie des ménages évolue de manière plus ou moins proportionnelle à leur revenu (voir section 1.5).

Pourtant dans la réalité, la consommation d'énergie n'a aucune utilité en soi. Comme formalisée théoriquement par Lancaster (Lancaster, 1966a, 1966b) et appliquée dans certains modèles hybrides (Laitner et Hanson, 2006), les ménages ne consomment pas l'énergie pour son utilité directe, mais plutôt pour le service qu'elle fournit lorsque sa consommation est combinée à l'utilisation de biens d'équipement, comme une voiture ou un logement. En effet, il est inutile d'acheter de l'essence si l'on ne possède pas un véhicule.

Une représentation théorique plus réaliste consiste donc à supposer que l'énergie est un « input » utilisé en combinaison avec différents types de capital dans la fonction de production des ménages. Cela représente le fait que certains services sont produits directement (plutôt qu'achetés) par les ménages, comme les transports, par exemple. Les ménages peuvent acheter directement ce service au secteur du transport public. Alternativement, ils peuvent investir en capital *via* l'achat d'un véhicule et acheter la quantité d'essence nécessaire pour combler leurs besoins en mobilité. Nous avons explicitement défini une fonction de production pour les ménages avec deux principaux composants : les logements et les transports (voir graphique 3).

Nous supposons que les dépenses liées au logement et au transport sont prioritaires. Elles sont donc soustraites du revenu disponible. Pour les autres dépenses, nous supposons que les ménages maximisent une fonction d'utilité LES sous contrainte de revenu comme décrit dans la section 1.5. Le revenu considéré est le revenu disponible amputé des dépenses prioritaires. Dans cette section, nous présenterons les principales équations du bloc logement de la version hybride du modèle. Une présentation complète de ce bloc se trouve dans Callonnec *et al.* (2013).

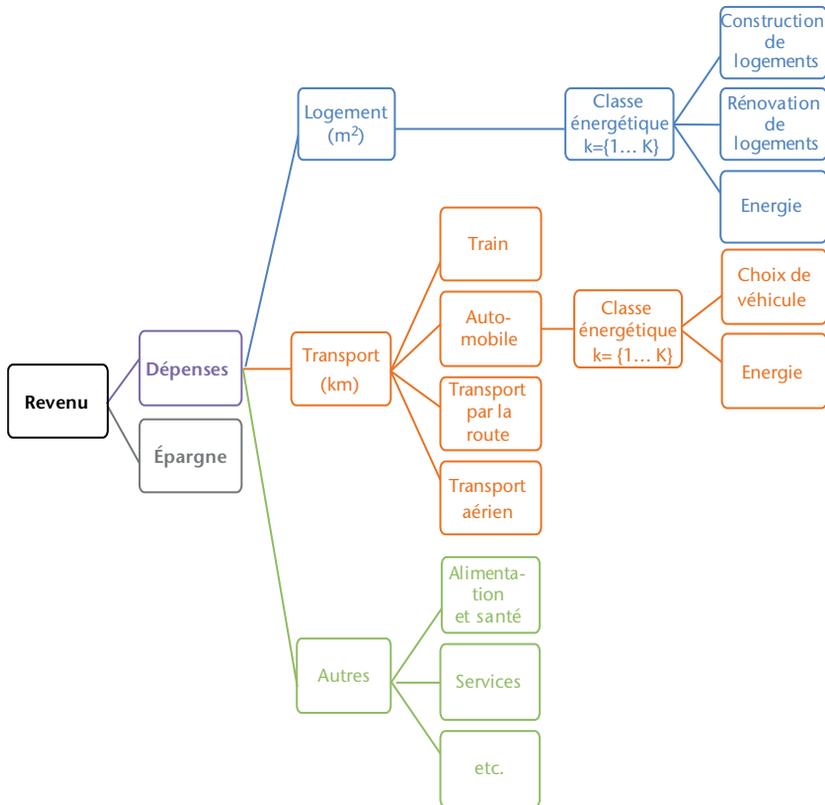
Nous différencions les logements selon leur efficacité énergétique par classe, $k = \{1, \dots, K\}$. Si $k > k'$, la classe k a une meilleure performance énergétique que la classe k' : sa consommation énergétique par m^2 est inférieure. Nous supposons que le stock de logements par classe k exprimé en m^2 est défini par la dynamique suivante :

$$\begin{aligned} \Delta BUIL_{k,t} = & \varphi_k^{NewBUIL} * (\Delta BUIL_t + BUIL_{0,t}) \\ & + \sum_{k'=1}^{k-1} REHAB_{k',k} - \sum_{k'=k+1}^K REHAB_{k,k'} \\ & - \sum_{k'=0}^{k-1} \delta_{k,k'}^{BUIL} * BUIL_{k,t-1} + \sum_{k'=k+1}^K \delta_{k',k}^{BUIL} * BUIL_{k',t-1} \end{aligned} \quad (22)$$

$$BUIL_{0,t} = \sum_k \delta_{k,0}^{BUIL} * BUIL_{k,t-1} \quad (23)$$

$$\Delta \ln(BUIL_t) = \Delta \ln(POP_t) + \Delta \ln(M2PERCAPITA_t) \quad (24)$$

Graphique 3. Structure de la dépense des ménages



Source : ThreeMe, construction propre.

Où $BUIL_{k,t}$ est le stock de logements de la classe k , $BUIL_t$ dans l'équation (24) est le total du stock de logements qui dépend de l'évolution de la population (POP_t) et du nombre de m² par habitant ($M2PERCAPITA_t$), $BUIL_{0,t}$ est le stock de logements détruit dans la période précédente et reconstruit dans la période courante. $\varphi_k^{NewBUIL}$ est la part de nouveaux logements construits avec le label de la classe k ($\sum_k \varphi_k^{NewBUIL} = 1$). $REHAB_{k,k'}$ est le nombre de m² réhabilités de la classe k à la classe k' (avec $k < k'$ and $REHAB_{k,k'} = 0$), $\delta_{k,k'}^{BUIL}$ est le taux de dépréciation (déclassement) de la classe k' à la classe k (avec $k' > k$).

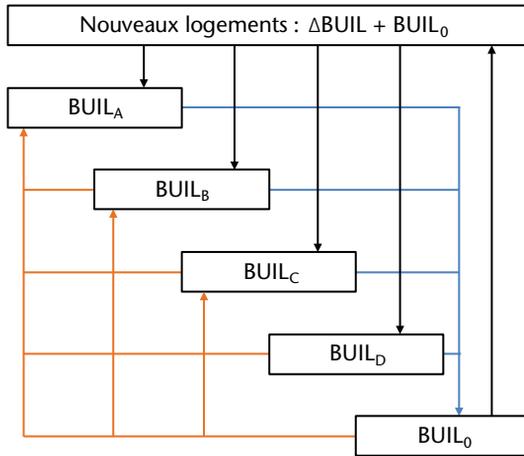
L'équation (22) suppose qu'à chaque période t , le stock de logements de la classe k :

- augmente de la quantité de nouveaux logements (re-)construits dans la classe k : $\varphi_k^{NewBUIL} * \Delta BUIL_t + BUIL_{0,t}$;
- augmente de la quantité de logements réhabilités d'une classe inférieure vers la classe k : $\sum_{k'=1}^{k-1} REHAB_{k',k}$;
- augmente de la quantité de logements déclassés des classes supérieures à k : $\sum_{k'=k+1}^K \delta_{k',k}^{BUIL} * BUIL_{k',t-1}$;
- diminue de la quantité de logements k réhabilités vers une classe supérieure à k : $\sum_{k'=k+1}^K REHAB_{k,k'}$;
- diminue de la quantité de logements k déclassés vers une classe inférieure à k : $\sum_{k'=0}^{k-1} \delta_{k,k'}^{BUIL} * BUIL_{k,t-1}$ où la « classe 0 » se réfère aux logements détruits.

Cette dynamique du stock de logements est schématisée dans le graphique 4. Les lignes bleues représentent le mécanisme de déclassement. Au fil du temps, les logements des classes énergétiques supérieures deviennent moins efficaces et sont déclassés graduellement jusqu'à ce qu'ils soient éventuellement détruits ($BUIL_0$). Les lignes oranges représentent le mécanisme de réhabilitation : en investissant dans la rénovation, les ménages ont la possibilité d'augmenter l'efficacité énergétique de leur logement. Finalement, les lignes noires définissent les processus de (re-)construction. De nouveaux logements sont construits parce que le total du parc de logements augmente de $\Delta BUIL$ et que les logements détruits ($BUIL_0$) sont reconstruits.

À chaque période, une partie des logements de la classe k est réhabilitée :

Graphique 4. Dynamique du stock de logements



Source : ThreeMe, construction propre.

$\tau_k^{REHAB} = \sum_{k'=k+1}^K REHAB_{k,k'} / BUIL_k$. Cette part n'est pas constante dans le temps, elle augmente avec la hausse du prix de l'énergie qui encourage la rénovation de logements. τ_k^{REHAB} dépend du coût d'usage du logement et des exigences imposées d'efficacité énergétique (τ_k^{REHAB*} , qui est exogène). Cela nous donne la spécification suivante :

$$\Delta \tau_k^{REHAB} = \Delta \tau_k^{REHAB*} + \eta_k * \ln(PAYBACK_k)$$

$$PAYBACK_k = \frac{UC_k^{K,REHAB} - UC_k^K}{UC_k^E - UC_k^{E,REHAB}} \tag{25}$$

Où $PAYBACK_k$ est le temps de retour de l'investissement de rénovation énergétique pour les logements de classe k . Il correspond au ratio entre le surcoût d'investissement lié à la rénovation et le montant de la baisse de la facture énergétique. Le surcoût d'investissement correspond à l'écart entre les coûts d'usage du logement si le logement est réhabilité ($UC_k^{K,REHAB}$) et s'il ne l'est pas (UC_k^K). La baisse de la facture énergétique correspond à l'écart entre des coûts d'usage énergétique des logements non-rénovés (UC_k^E) et rénovés ($UC_k^{E,REHAB}$). Ces coûts d'usage énergétique sont définis sur toute la durée de vie de l'investissement et intègre donc le taux de croissance anticipé du prix de l'énergie.

Comme expliqué précédemment, un logement d'une classe donnée k peut être réhabilité de diverses manières correspondant à différentes classes supérieures. Il serait donc logique de supposer que le choix entre les classes supérieures soit endogène et qu'il dépende des coûts relatifs de chaque option de rénovation. Cependant, faute de données, il est difficile de modéliser et de calibrer ce type d'arbitrage. De plus, ce choix est fortement déterminé par les standards techniques de rénovation, ce qui limite l'influence des prix relatifs. C'est pourquoi, nous supposons que cet arbitrage est exogène, c'est-à-dire que la part des logements de classe k réhabilités en classe k' ($\varphi_{h,k,k'}^{REHAB}$) est exogène :

$$REHAB_{k,k'} = \varphi_{k,k'}^{REHAB} * \tau_k^{REHAB} * BUIL_{k,t-1} \quad (26)$$

$$\sum_{k'} \varphi_{k,k'}^{REHAB} = 1$$

La consommation énergétique est déterminée par la dynamique du parc immobilier puisqu'elle dépend du nombre de m^2 total mais aussi de la classe énergétique à laquelle appartiennent les logements : la consommation par m^2 diffère entre les classes.

La modélisation du transport automobile et des consommations énergétiques associées est similaire à celle du logement. La dynamique du stock de véhicules est toutefois plus simple puisque la rénovation énergétique des véhicules n'est pas possible et que nous supposons l'absence de déclassement énergétique (pour plus de détails voir Callonnec *et al.*, 2013).

2. Propriétés dynamiques et de long terme

ThreeME est un modèle de type néo-keynésien car il prend en considération des phénomènes de viscosité dans les dynamiques d'ajustement des prix ou des quantités. Néanmoins à long terme, le modèle est de type néoclassique dans le sens où il converge vers un sentier de croissance équilibré « à la Solow » (1956) : tous les volumes (PIB, production, consommation, capital, etc.) croissent à un taux constant égal à la somme des taux de croissance de la population et de la productivité du travail et tous les prix croissent au rythme de la cible d'inflation.

Pour que le modèle converge vers un tel long terme, plusieurs conditions relatives à l'évolution des variables exogènes sont

nécessaires : la population, le progrès technique, la demande extérieure et les prix étrangers doivent croître à un taux constant ; les parts (du travail et du capital dans la production, des importations, etc.) et les taux (de participation, d'imposition, d'intérêt, de dépréciation du capital, etc.) ne doivent pas être affectés par des tendances exogènes. Par ailleurs, des conditions d'homogénéité relatives à la spécification des équations doivent être satisfaites. Il s'agit de garantir que la spécification de chaque équation est compatible avec la représentation d'un long terme équilibré. Ainsi la fonction de production doit être homogène de degré 1 (rendement d'échelle constant) pour que la production croisse à long terme comme la somme des taux de croissance de la population et de la productivité du travail. Deux équations définissant la même variable à long terme doivent être cohérentes. Par exemple, le salaire réel est défini à la fois par l'équation de prix et l'équation de salaire. Pour que le taux d'inflation soit stable, il faut qu'à long terme le salaire réel croisse comme la productivité du travail, ce qui implique que le taux de chômage d'équilibre soit constant à long terme. Comme mentionné précédemment, dans le cas d'une courbe WS, il faut imposer une indexation unitaire des salaires sur les prix et la productivité du travail.

Alors que les contraintes d'homogénéité rendent possible l'existence d'un sentier de long terme équilibré, elles ne garantissent pas que la dynamique du modèle converge vers ce long terme. Pour cela, des contraintes dynamiques sont nécessaires. Ainsi, suite à un choc, un mécanisme de correction doit garantir la convergence vers un nouvel équilibre. Dans *ThreeME*, la régulation du système passe en partie par le commerce extérieur. Par exemple, un choc de demande positif entraînera une baisse du chômage et une hausse de l'inflation. La baisse de compétitivité par rapport au reste du monde enrayera progressivement l'effet positif, faisant converger le modèle vers un nouvel équilibre. Pour que ce mécanisme apparaisse, les élasticités de substitution entre produits domestiques et étrangers doivent respecter la théorie des élasticités critiques ou conditions de Marshall-Lerner⁴.

Dans cette section, les propriétés dynamiques et de long terme du modèle sont analysées. Pour cela, nous réalisons volontairement des variantes dites « naïves » dans le sens où nous omettons certains effets indirects qui pourraient être pris en compte mais qui

compliqueraient l'analyse des résultats. Cela permet de mieux mettre en évidence les mécanismes et les hypothèses-clés sous-jacents aux résultats, tels que la définition de l'équation de salaire (courbe WS versus courbe de Phillips). Les sous-sections 2.1 à 2.5 étudient les résultats dans le cas de la version standard du modèle selon deux spécifications de l'équation de salaire : une courbe WS et une courbe de Phillips. Pour chaque variante, les résultats avec les deux spécifications sont très similaires à l'horizon de moyen terme (10 ans). Pour cet horizon, nous ne commenterons donc que les chiffres obtenus avec la courbe WS, le raisonnement pouvant être répliqué pour la courbe de Phillips. Pour le long terme (ici approché à 35 ans), les résultats des deux courbes seront commentés. La sous-section 2.6 compare les résultats du modèle ThreeME standard avec ceux du modèle MESANGE dans le cas d'une hausse du prix du pétrole et d'une baisse des cotisations sociales employeurs. Pour ce même choc, la sous-section 2.7 compare les résultats obtenus avec les versions standard et hybride de ThreeME.

2.1. Hausse permanente du prix du pétrole et du gaz de 10 %

La hausse du prix des énergies fossiles est à la fois un choc d'offre et un choc de demande. Un choc d'offre puisqu'une hausse du prix du pétrole et du gaz accroît les coûts de production des entreprises et un choc de demande car elle réduit le pouvoir d'achat des ménages. Ce choc inflationniste par la hausse du prix des importations entraîne une baisse de l'activité (voir tableau 3). À l'horizon de 10 ans, la hausse du prix des imports (+1,63 % par rapport au scénario de référence) s'est largement transmise au prix nationaux : les prix de consommation, de production et d'exportation augmentent respectivement de 0,76 %, 0,69 % et 0,78 %. L'augmentation de l'inflation détériore la compétitivité-prix, ce qui a un effet

4. Les conditions de Marshall-Lerner stipulent que la somme des élasticités des exportations et de celles des importations doit être supérieure à 1 de façon à ce qu'une appréciation du taux de change réel entraîne une dégradation de la balance commerciale en valeur. Un autre mécanisme peut passer par la politique monétaire et un comportement patrimonial des ménages. La hausse de l'inflation entraîne une hausse du taux d'intérêt qui en retour a un effet négatif sur la demande *via* la hausse du taux d'épargne et la baisse de l'investissement des entreprises. Dans cette étude, ce mécanisme n'est pas activé car nous supposons le taux d'intérêt et le taux d'épargne désiré constants. Pour plus de détails sur les contraintes de long terme voir l'Annexe A de Callonnet *et al.* (2013).

négatif permanent sur les exportations, $-0,07\%$ la troisième année et $-0,15\%$ la cinquième année. Le PIB chute de $0,30\%$ à la suite de la baisse de la consommation des ménages ($-0,53\%$), de l'investissement ($-0,20\%$) et des exportations ($-0,30\%$).

Du fait de la hausse du taux de chômage ($+0,28$ point), les salaires nominaux s'ajustent imparfaitement au prix, le salaire réel diminue ($-0,49\%$) et le pouvoir d'achat des ménages se dégrade, amplifiant l'effet récessif sur la consommation de ménages. La baisse de l'activité entraîne (mais est aussi renforcée par) la baisse de l'investissement et l'emploi (63 000 salariés en moins). L'investissement baisse moins que le PIB et la production (résultat non montré) car les entreprises substituent du capital à leur consommation d'énergie.

L'amplitude et la persistance du choc à long terme va dépendre des hypothèses prises en compte dans la spécification de l'équation de salaire. Avec une courbe « Wage-Setting » (WS), le taux de chômage d'équilibre augmente de manière permanente à la suite d'une hausse du prix des énergies fossiles alors que cette hausse n'est que transitoire avec une courbe de Phillips (voir e. g. L'Horty et Thibault, 1998 ; Blanchard et Katz, 1999 ; Chagny *et al.*, 2002). Aussi voyons-nous dans le tableau 3, que l'augmentation du taux de chômage à 35 ans est de $0,28$ point avec une courbe WS et de 0 point avec une courbe de Phillips.

Afin de vérifier la stabilité de la dynamique du modèle et que l'horizon de 35 ans fournit une bonne approximation du long terme, le graphique 5 présente les résultats de simulation du même choc à l'horizon de 100 ans. Avec une courbe WS, la hausse du chômage est permanente alors que le taux de chômage retourne à son niveau initial avec une courbe de Phillips au bout de 30 ans environ. La hausse du chômage parvient à stabiliser la hausse des prix avec une courbe WS alors qu'elle renverse la dynamique inflationniste dans le cas d'une courbe de Phillips, de sorte que le prix à la consommation baisse à long terme. La hausse du chômage a un impact plus fort sur l'inflation avec une courbe de Phillips car le taux de croissance des salaires dépend négativement du niveau du taux de chômage et pas seulement de sa variation comme dans le cas d'une courbe WS.

Tableau 3. Hausse de 10 % des prix du pétrole et du gaz, courbe WS et courbe de Phillips

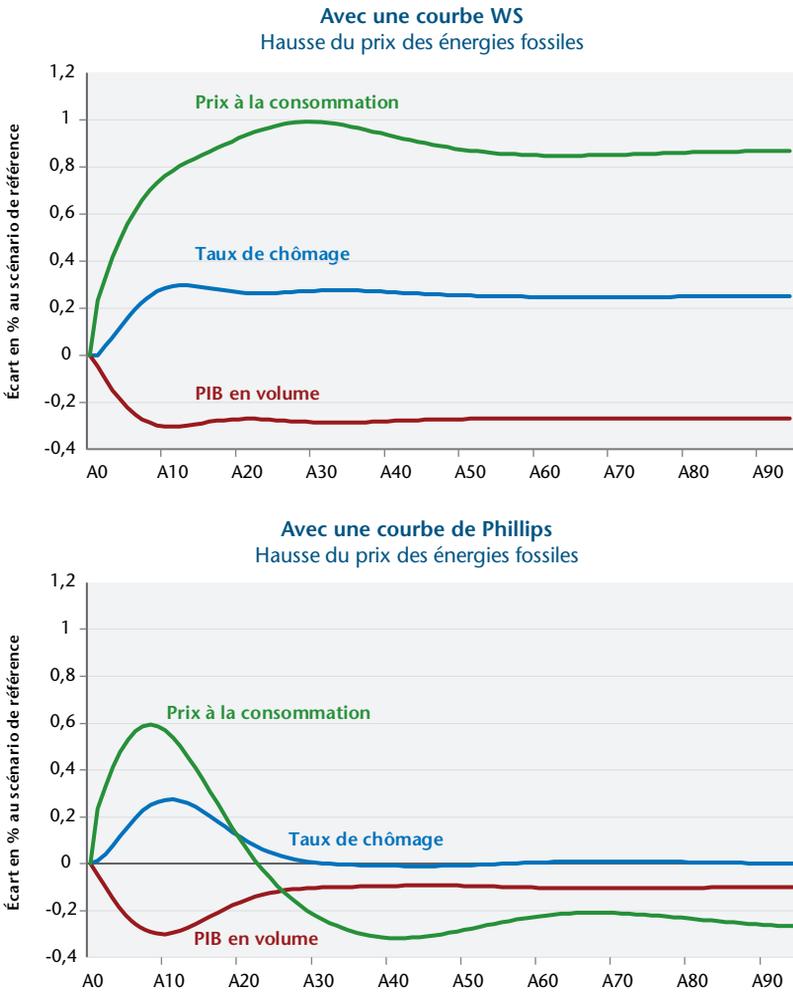
Hausse permanente de 10 % des prix du pétrole et du gaz		ThreeME STANDARD (WS)					ThreeME STANDARD (COURBE PHILLIPS)				
		1 an	3 ans	5 ans	10 ans	35 ans	1 an	3 ans	5 ans	10 ans	35 ans
PIB en volume	(a)	-0,05	-0,15	-0,22	-0,30	-0,28	-0,05	-0,15	-0,23	-0,30	-0,10
VA du secteur marchand	(a)	-0,03	-0,13	-0,21	-0,30	-0,28	-0,03	-0,14	-0,22	-0,30	-0,06
Consommation des ménages	(a)	-0,11	-0,33	-0,45	-0,53	-0,39	-0,11	-0,33	-0,47	-0,57	-0,51
Investissement	(a)	0,00	-0,05	-0,10	-0,20	-0,14	0,00	-0,05	-0,11	-0,21	0,08
Investissement des SNF et EI*	(a)	0,00	-0,06	-0,13	-0,25	-0,17	0,00	-0,06	-0,14	-0,26	0,13
Exportations	(a)	-0,01	-0,07	-0,15	-0,30	-0,49	-0,01	-0,07	-0,14	-0,24	0,22
Importations	(a)	-0,10	-0,29	-0,40	-0,48	-0,38	-0,10	-0,29	-0,41	-0,52	-0,51
Revenu disponible réel des ménages	(a)	-0,18	-0,38	-0,47	-0,51	-0,39	-0,18	-0,38	-0,48	-0,55	-0,51
Taux d'épargne	(b)	-0,07	-0,04	-0,01	0,02	0,00	-0,07	-0,05	-0,01	0,02	0,00
Prix à la consommation des ménages	(a)	0,23	0,42	0,56	0,76	0,97	0,23	0,41	0,53	0,57	-0,29
Prix de production marchande	(a)	0,13	0,32	0,47	0,69	0,91	0,13	0,32	0,44	0,48	-0,45
Prix des exportations	(a)	0,18	0,40	0,57	0,78	0,99	0,18	0,40	0,54	0,60	-0,24
Prix des importations	(a)	1,39	1,46	1,53	1,63	1,73	1,39	1,46	1,52	1,55	1,18
Salaire réel net	(a)	-0,24	-0,33	-0,38	-0,49	-0,46	-0,24	-0,34	-0,42	-0,66	-0,80
Coût réel du travail	(a)	-0,14	-0,23	-0,30	-0,42	-0,41	-0,14	-0,25	-0,34	-0,58	-0,64
Emploi salarié en milliers	(d)	-3	-19	-37	-63	-67	-3	-19	-38	-61	0
Taux de chômage	(b)	0,01	0,08	0,16	0,28	0,28	0,01	0,08	0,16	0,27	0,00
Balance commerciale	(c)	-0,32	-0,24	-0,20	-0,19	-0,24	-0,32	-0,24	-0,20	-0,19	-0,20
Solde primaire	(c)	-0,05	-0,17	-0,22	-0,26	-0,23	-0,05	-0,17	-0,22	-0,25	-0,16
Emissions	(a)	-0,59	-1,42	-1,82	-2,10	-1,97	-0,59	-1,42	-1,83	-2,15	-2,10

(a) Écart relatif en % par rapport au scénario de référence (b) en points, (c) en % du PIB, (d) en milliers.

* SNF (Sociétés non financières) et EI (Entreprises individuelles).

Source : ThreeME, calcul des auteurs.

Graphique 5. Hausse de 10 % des prix du pétrole et du gaz, courbe WS et courbe de Phillips



Source : ThreeME, calcul des auteurs.

Il est important de rappeler que cette variante de hausse de 10 % du prix du pétrole et du gaz est parfois qualifiée de « naïve » ou « d’analytique » car les prix étrangers et la demande mondiale sont supposés inchangés. Or l’augmentation du cours des énergies fossiles a aussi un effet inflationniste sur l’activité dans le reste du monde. D’un côté, nous exagérons la perte de compétitivité de la France et donc la dégradation de la balance commerciale associée.

D'un autre, nous surestimons le dynamisme de la demande mondiale adressée à la France et sous-estimons l'inflation importée et donc l'activité économique. Le bilan de ces effets sur l'économie française sont difficiles à mesurer même avec un modèle multinational car il dépend de beaucoup de paramètres souvent incertains : niveau des élasticités de substitution des équations de commerce extérieur, utilisation des revenus pétroliers, effets sur le taux de change, etc. Un exercice de variante dite « naïve » reste donc pertinent du fait de l'incertitude entourant ces effets de second tour mais aussi car il permet de mettre en évidence certains mécanismes fondamentaux du modèle.

2.2. Baisse permanente de 1 % de PIB des cotisations employeurs

Nous simulons maintenant une baisse des cotisations sociales employeurs de 1 point de PIB (voir tableau 4), soit une baisse de 7,4 % du taux de cotisations apparent de l'ensemble des branches d'activité. La baisse du coût du travail induite par ce choc va jouer à plusieurs niveaux. En premier lieu sur le niveau des prix en diminuant le coût de production, ce qui va conduire à une hausse du revenu disponible réel des ménages et donc de la consommation. La baisse concomitante du taux de chômage de 0,07 point la première année et de 0,68 point à 5 ans est due à l'effet de relance sur la demande mais aussi au changement des prix relatifs entre les facteurs de production qui se traduit par des substitutions favorables à l'emploi. Ces effets sont similaires à court et moyen terme avec une courbe WS et une courbe de Phillips.

La baisse du coût du travail et donc des coûts de production améliore aussi la compétitivité des entreprises. Cela se traduit par une augmentation des exportations (+0,38 % à 5 ans). La baisse des importations n'est pas visible car l'effet (négatif) de substitution entre produits nationaux et étrangers est contrebalancé par l'effet (positif) de revenu consécutif à la hausse de la demande nationale. Si l'amélioration de la compétitivité entraîne une amélioration de la balance commerciale en volume (non reportée dans le tableau 4), la balance commerciale en valeur diminue du fait de la détérioration des termes de l'échange : la France vend plus, mais moins cher.

Tableau 4. Baisse permanente de 1 % du PIB des cotisations sociales employeurs, courbe WS et courbe de Phillips

Baisse permanente de 1 % de PIB des cotisations employeurs		ThreeME STANDARD (WS)					ThreeME STANDARD (COURBE DE PHILLIPS)				
		1 an	3 ans	5 ans	10 ans	35 ans	1 an	3 ans	5 ans	10 ans	35 ans
PIB en volume	(a)	0,12	0,48	0,74	0,92	0,73	0,12	0,49	0,76	0,92	0,15
VA du secteur marchand	(a)	0,14	0,56	0,86	1,07	0,85	0,14	0,56	0,88	1,06	0,16
Consommation des ménages	(a)	0,19	0,77	1,17	1,41	1,13	0,19	0,78	1,21	1,56	1,54
Investissement	(a)	0,02	0,27	0,57	0,95	0,72	0,02	0,28	0,59	1,00	0,02
Investissement des SNF et EI	(a)	0,05	0,38	0,75	1,23	0,95	0,05	0,39	0,77	1,27	0,00
Exportations	(a)	0,06	0,22	0,38	0,49	0,38	0,06	0,22	0,35	0,27	-1,86
Importations	(a)	0,05	0,32	0,56	0,78	0,61	0,05	0,33	0,59	0,93	1,05
Revenu disponible réel des ménages	(a)	0,31	0,91	1,22	1,35	1,12	0,31	0,93	1,28	1,51	1,54
Taux d'épargne	(b)	0,11	0,13	0,05	-0,06	0,00	0,11	0,14	0,06	-0,05	0,00
Prix à la consommation des ménages	(a)	-0,35	-0,75	-0,92	-0,78	-0,66	-0,34	-0,73	-0,83	-0,13	3,30
Prix de production marchande	(a)	-0,41	-0,86	-1,04	-0,88	-0,75	-0,40	-0,84	-0,94	-0,16	3,55
Prix des exportations	(a)	-0,32	-0,71	-0,90	-0,80	-0,67	-0,31	-0,70	-0,82	-0,19	3,23
Prix des importations	(a)	-0,14	-0,32	-0,40	-0,37	-0,30	-0,14	-0,31	-0,37	-0,10	1,44
Salaire réel net	(a)	0,40	0,86	1,17	1,67	1,43	0,40	0,90	1,32	2,27	2,45
Coût réel du travail	(a)	-1,26	-0,76	-0,43	0,03	-0,22	-1,26	-0,72	-0,30	0,55	0,44
Emploi salarié en milliers	(d)	18	88	159	228	191	18	89	160	219	-18
Taux de chômage	(b)	-0,07	-0,36	-0,68	-1,04	-0,79	-0,07	-0,36	-0,68	-1,01	0,09
Balance commerciale	(c)	-0,05	-0,14	-0,19	-0,20	-0,17	-0,05	-0,14	-0,19	-0,20	-0,30
Solde primaire	(c)	-0,45	-0,28	-0,16	-0,05	-0,15	-0,45	-0,28	-0,16	-0,07	-0,38
Emissions	(a)	0,07	0,38	0,65	0,90	0,71	0,07	0,39	0,69	1,06	1,12

(a) Écart relatif en % par rapport au scénario de référence (b) en points, (c) en % du PIB, (d) en milliers.

Source : ThreeME, calcul des auteurs.

À long terme, l'effet favorable sur la compétitivité et l'emploi est permanent avec une courbe WS alors que l'effet est transitoire avec une courbe de Phillips. Cela vient du fait que la baisse du taux de chômage d'équilibre est permanente dans la cas d'une courbe WS alors qu'elle est transitoire avec une courbe de Phillips (voir Chagny *et al.*, 2002). Avec une courbe de Phillips, la baisse du chômage en dessous de son niveau d'équilibre de long terme entraîne une hausse de l'inflation qui à terme annule les bénéfices sur la compétitivité et l'activité.

2.3. Hausse permanente de la taxe carbone correspondant la première année à 1 % du PIB « ex ante »

Nous supposons que la France introduit une taxe carbone de 1 % de PIB de façon unilatérale et sans aucun ajustement aux frontières. Nous considérons deux cas : sans ou avec redistribution des recettes de la taxe carbone. Les recettes de la taxe, qui ne sont pas redistribuées, sont affectées intégralement à la réduction du déficit. Le taux de la taxe est calculé sur la base du contenu en carbone de chaque type d'énergie, ce qui équivaut à un prix de 44 euros par tonne de CO₂. Ce type de politique a pour principal objectif de réduire les émissions de dioxyde de carbone et donc la demande en énergie fossile.

L'instauration de la taxe carbone sans distribution de recettes entraîne une élévation du prix des énergies fossiles dont les effets macroéconomiques sont proches d'une hausse du prix du pétrole. Toutefois, à la différence de cette dernière, l'instauration de la taxe réduit le déficit public. Cette réduction diminue au cours du temps (0,75 point de PIB la première année contre 0,34 la cinquième année) du fait de l'effet négatif sur l'activité économique et de la réduction de l'assiette de la taxe (réduction des émissions). La hausse du prix à la consommation, de plus de 1 % à partir de la troisième année, a un impact négatif sur la consommation des ménages. Etant donné que nous supposons que le reste du monde ne suit pas la même politique, la France essuie une perte de compétitivité due au renchérissement des coûts de production et donc des prix nationaux. Cela se traduit par une chute des exportations.

En raison de l'effet multiplicateur négatif, l'impact récessif est renforcé par la baisse de l'investissement qui diminue de 0,38 % la

cinquième année. Avec la baisse de l'activité, l'emploi diminue de 106 000.

À long terme, la hausse du chômage est permanente avec la courbe WS alors qu'elle n'est que transitoire avec une courbe de Phillips. Ce résultat provient du fait que la hausse de la fiscalité entraîne une hausse permanente du taux de chômage d'équilibre seulement dans le cas d'une courbe WS.

La taxe carbone accompagnée d'une redistribution intégrale des recettes, *via* une diminution de l'impôt sur le revenu des ménages et une baisse de cotisations employeurs des entreprises⁵, peut au contraire avoir un effet positif sur l'activité. Les résultats macroéconomiques d'une telle variante sont résumés dans le tableau 6.

Lors de la première année de la mise en place de la taxe, le prix à la consommation augmente de 0,59 % et la consommation finale affiche une légère amélioration de 0,1 % imputable à l'augmentation du pouvoir d'achat des ménages, dont le revenu disponible réel augmente du fait de la redistribution des recettes de la taxe, mais aussi parce que la mesure a des effets positifs sur l'emploi : l'allègement du coût du travail et le renchérissement des coûts des autres facteurs de production stimulent la demande en main-d'œuvre. Ainsi la baisse marquée du coût réel du travail de 0,96 % la première année se traduit par une substitution en faveur du facteur travail. De son côté, l'investissement productif réagit de la même manière que la consommation finale. L'effet sur le PIB est donc positif, il augmente de 0,13 % par rapport au sentier de référence.

Entre 3 et 5 ans, les effets positifs de la redistribution s'accroissent et un cercle vertueux de croissance et de baisse du chômage s'amorce. Le PIB progresse plus vite du fait des effets multiplicateur et accélérateur. Il atteint un niveau de 0,30 % supérieur à celui du compte central la cinquième année. Ce transfert de fiscalité, neutre *ex ante*, réduit le déficit *ex post* du fait de la hausse de l'activité. La baisse durable des importations en dépit de la hausse de l'activité reflète le fait que la France est un importateur net d'énergies fossiles. Elle permet une hausse de la balance commerciale.

5. La taxe carbone payée par les ménages est distribuée dans son intégralité à travers une diminution du taux de l'impôt sur le revenu. La taxe carbone payée par les secteurs d'activité est aussi distribuée dans sa totalité à travers une réduction du taux moyen de cotisations employeurs.

Tableau 5. Hausse permanente de la taxe carbone correspondant la première année à 1 % du PIB en volume « ex ante » sans distribution, courbe WS vs. courbe de Phillips

Hausse permanente de 1 % de PIB du montant de la taxe carbone sans distribution		ThreeME STANDARD (WS)					ThreeME STANDARD (COURBE DE PHILLIPS)				
		1 an	3 ans	5 ans	10 ans	35 ans	1 an	3 ans	5 ans	10 ans	35 ans
PIB en volume	(a)	-0,12	-0,37	-0,57	-0,80	-0,71	-0,12	-0,38	-0,58	-0,79	-0,19
VA du secteur marchand	(a)	-0,15	-0,40	-0,62	-0,88	-0,78	-0,15	-0,41	-0,64	-0,87	-0,17
Consommation des ménages	(a)	-0,36	-0,84	-1,13	-1,38	-1,08	-0,36	-0,85	-1,17	-1,49	-1,37
Investissement	(a)	-0,03	-0,20	-0,38	-0,68	-0,49	-0,03	-0,20	-0,39	-0,72	0,12
Investissement des SNF et EI	(a)	-0,05	-0,26	-0,50	-0,88	-0,64	-0,05	-0,27	-0,52	-0,91	0,18
Exportations	(a)	-0,06	-0,26	-0,46	-0,79	-1,04	-0,06	-0,25	-0,44	-0,61	0,86
Importations	(a)	-0,43	-0,85	-1,08	-1,31	-1,10	-0,43	-0,86	-1,11	-1,42	-1,41
Revenu disponible réel des ménages	(a)	-0,59	-0,93	-1,16	-1,34	-1,08	-0,60	-0,95	-1,21	-1,45	-1,37
Taux d'épargne	(b)	-0,22	-0,09	-0,03	0,04	0,00	-0,22	-0,09	-0,04	0,04	0,00
Prix à la consommation des ménages	(a)	0,75	1,08	1,36	1,70	1,97	0,75	1,06	1,28	1,16	-1,36
Prix de production marchande	(a)	0,22	0,61	0,92	1,26	1,55	0,22	0,59	0,83	0,67	-2,03
Prix des exportations	(a)	0,36	0,86	1,19	1,55	1,81	0,36	0,84	1,12	1,05	-1,45
Prix des importations	(a)	0,17	0,40	0,56	0,73	0,83	0,17	0,40	0,53	0,50	-0,64
Salaire réel net	(a)	-0,78	-0,83	-0,95	-1,30	-1,20	-0,78	-0,87	-1,08	-1,75	-2,04
Coût réel du travail	(a)	-0,26	-0,37	-0,52	-0,89	-0,81	-0,26	-0,41	-0,64	-1,29	-1,38
Emploi salarié en milliers	(d)	-13	-58	-106	-177	-170	-13	-58	-107	-168	12
Taux de chômage	(b)	0,05	0,24	0,45	0,79	0,70	0,05	0,24	0,45	0,76	-0,06
Balance commerciale	(c)	0,16	0,29	0,35	0,37	0,29	0,16	0,29	0,35	0,38	0,40
Solde primaire	(c)	0,75	0,48	0,34	0,22	0,30	0,75	0,47	0,34	0,24	0,50
Emissions	(a)	-4,19	-8,04	-9,58	-10,70	-10,57	-4,19	-8,04	-9,61	-10,79	-10,69

(a) Écart relatif en % par rapport au scénario de référence (b) en points, (c) en % du PIB, (d) en milliers.

Source : ThreeME, calcul des auteurs.

La réduction progressive des émissions de CO₂ (-3,91 % à 1 an, -8,39 % à 5 ans et -9,30 % à long terme) se traduit par un rétrécissement de l'assiette fiscale de la taxe, ce qui réduit le montant des recettes recyclées et donc l'effet d'entraînement sur l'activité économique. Dans le cas présent, l'effet d'érosion de l'assiette fiscale sur les recettes de la taxe carbone n'est pas compensé par une trajectoire croissante du taux de la taxe carbone. À long terme, cet effet jumelé avec une perte de la compétitivité (-1,34 % pour les exportations), déclenche une légère diminution de l'activité (-0,01 %).

Tableau 6. Hausse permanente de la taxe carbone correspondant la première année à 1 % de PIB en volume « ex ante » avec distribution des recettes

		ThreeME STANDARD (WS)				
Hausse permanente de 1 % de PIB du montant de la taxe carbone avec distribution		1 an	3 ans	5 ans	10 ans	35 ans
PIB en volume	(a)	0,13	0,27	0,30	0,13	-0,01
VA du secteur marchand	(a)	0,12	0,28	0,32	0,11	-0,05
Consommation des ménages	(a)	0,10	0,29	0,40	0,36	0,48
Investissement	(a)	0,08	0,27	0,39	0,38	0,21
Investissement des SNF et EI	(a)	0,10	0,31	0,45	0,41	0,18
Exportations	(a)	-0,01	-0,08	-0,21	-0,71	-1,34
Importations	(a)	-0,22	-0,25	-0,20	-0,18	-0,11
Revenu disponible réel des ménages	(a)	0,15	0,34	0,41	0,33	0,47
Taux d'épargne	(b)	0,05	0,04	0,01	-0,02	-0,01
Prix à la consommation des ménages	(a)	0,59	0,79	1,16	2,16	2,75
Prix de production marchande	(a)	0,01	0,23	0,63	1,71	2,34
Prix des exportations	(a)	0,08	0,32	0,68	1,65	2,27
Prix des importations	(a)	0,03	0,13	0,28	0,72	1,00
Salaire réel net	(a)	-0,54	-0,18	0,05	0,18	-0,04
Coût réel du travail	(a)	-0,96	-0,58	-0,36	-0,29	-0,56
Emploi salarié en milliers	(d)	15	50	67	31	-20
Taux de chômage	(b)	-0,06	-0,21	-0,29	-0,16	0,09
Balance commerciale	(c)	0,08	0,11	0,12	0,12	0,02
Solde primaire	(c)	0,05	0,06	0,08	0,02	-0,02
Emissions	(a)	-3,91	-7,22	-8,39	-9,23	-9,30

(a) Écart relatif en % par rapport au scénario de référence (b) en points, (c) en % du PIB, (d) en milliers.

Source : ThreeME, calcul des auteurs.

2.4. Hausse permanente de 1 % de PIB de la TVA

Comme pour la taxe carbone non redistribuée, une hausse de 1 % de PIB de la TVA a un effet récessif (voir tableau 7). Un tel choc représente une augmentation des recettes de TVA de 18 milliards d'euros, soit une augmentation de 11,5 % des recettes de TVA. La baisse de la consommation intervient dès la première année mais elle est plus faible que le choc initial car elle est partiellement compensée par une baisse de l'épargne des ménages (due à l'inertie de leur consommation). Ainsi la baisse du PIB est limitée à 0,36 % la première année. Au bout de 10 ans la baisse du PIB est du même ordre de grandeur que le choc initial (-0,96 %). Le niveau de production se contracte, conduisant à une hausse du chômage dont le maximum est atteint au bout de 10 ans dans les deux versions du modèle (-215 000 emplois avec une courbe de WS contre -200 000 avec une courbe de Phillips). L'amélioration de la balance commerciale provient essentiellement de la baisse des importations due à la contraction de l'activité économique. Comme dans les simulations précédentes, cette réforme fiscale n'a un effet négatif permanent sur l'emploi que dans le cas d'une courbe WS.

2.5. Hausse permanente de 1 % de PIB de l'investissement des APU

Ce choc représente une hausse de 21 milliards d'euros du volume d'investissement des administrations publiques (APU), ce qui équivaut à une augmentation de 25,8 % par rapport au scénario de référence. Cette hausse de l'investissement des APU est un choc de demande positif qui entraîne une augmentation de l'activité dont l'effet culmine à l'horizon de 5 ans (voir tableau 8) avec une hausse du PIB de 1,32 %. À noter la différence d'impact avec le choc d'ampleur similaire de baisse de la TVA. Ici le multiplicateur est de 1 dès la première année (hausse du PIB de 1,02 %) alors qu'il n'est que de 0,36 dans le cas de la TVA du fait de l'inertie de la consommation des ménages (voir tableau 7).

L'augmentation de la demande permet aux entreprises d'augmenter leur capacité de production. À l'horizon de 5 ans, l'investissement des entreprises augmente de 1,43 % et le chômage diminue de 1,45 point, ce qui soutient la consommation des ménages et leur pouvoir d'achat. La hausse de la demande et la baisse du chômage entraînent une hausse des prix et des salaires qui vient enrayer la dynamique économique favorable après

Tableau 7. Hausse permanente de 1 % du PIB du montant de la TVA, courbe WS et courbe de Phillips

Hausse permanente de 1 % de PIB de la TVA		ThreeME STANDARD (WS)					ThreeME STANDARD (COURBE DE PHILLIPS)				
		1 an	3 ans	5 ans	10 ans	35 ans	1 an	3 ans	5 ans	10 ans	35 ans
PIB en volume	(a)	-0,36	-0,59	-0,74	-0,96	-0,85	-0,36	-0,60	-0,76	-0,94	-0,22
VA du secteur marchand	(a)	-0,38	-0,64	-0,81	-1,07	-0,94	-0,38	-0,65	-0,84	-1,04	-0,21
Consommation des ménages	(a)	-0,72	-1,17	-1,39	-1,69	-1,44	-0,73	-1,19	-1,46	-1,83	-1,81
Investissement	(a)	-0,20	-0,48	-0,66	-1,03	-0,97	-0,20	-0,49	-0,69	-1,06	-0,22
Investissement des SNF et EI	(a)	-0,24	-0,59	-0,82	-1,26	-1,16	-0,24	-0,60	-0,85	-1,28	-0,15
Exportations	(a)	0,01	-0,01	-0,08	-0,24	-0,30	0,01	0,00	-0,04	0,04	2,03
Importations	(a)	-0,41	-0,71	-0,84	-1,04	-0,91	-0,41	-0,73	-0,89	-1,19	-1,30
Revenu disponible réel des ménages	(a)	-1,16	-1,21	-1,40	-1,65	-1,44	-1,17	-1,24	-1,48	-1,79	-1,80
Taux d'épargne	(b)	-0,43	-0,04	-0,01	0,04	0,00	-0,43	-0,04	-0,02	0,04	0,00
Prix à la consommation des ménages	(a)	1,45	1,57	1,78	1,98	2,01	1,45	1,54	1,63	1,19	-1,98
Prix de production marchande	(a)	-0,03	0,11	0,33	0,53	0,57	-0,04	0,07	0,17	-0,32	-3,70
Prix des exportations	(a)	-0,03	0,08	0,27	0,49	0,52	-0,03	0,05	0,14	-0,25	-3,35
Prix des importations	(a)	-0,01	0,03	0,12	0,22	0,23	-0,01	0,02	0,06	-0,11	-1,52
Salaire réel net	(a)	-1,52	-1,16	-1,16	-1,49	-1,45	-1,53	-1,23	-1,37	-2,11	-2,47
Coût réel du travail	(a)	-0,07	0,28	0,26	-0,09	-0,05	-0,07	0,21	0,06	-0,64	-0,73
Emploi salarié en milliers	(d)	-34	-101	-148	-215	-203	-34	-102	-149	-200	20
Taux de chômage	(b)	0,13	0,42	0,64	0,97	0,83	0,14	0,42	0,64	0,91	-0,10
Balance commerciale	(c)	0,12	0,21	0,26	0,30	0,26	0,12	0,21	0,26	0,31	0,39
Solde primaire	(c)	0,61	0,40	0,29	0,17	0,25	0,61	0,40	0,29	0,20	0,50
Emissions	(a)	-0,53	-0,91	-1,06	-1,29	-1,14	-0,53	-0,93	-1,12	-1,45	-1,50

(a) Écart relatif en % par rapport au scénario de référence (b) en points, (c) en % du PIB, (d) en milliers.

Source : ThreeME, calcul des auteurs.

Tableau 8. : Hausse de l'investissement des APU de 1 % du PIB en volume, courbe WS vs. courbe de Phillips

Hausse de 1 % de PIB des Investissement des APU	ThreeME STANDARD (WS)					ThreeME STANDARD (COURBE DE PHILLIPS)					
		1 an	3 ans	5 ans	10 ans	35 ans	1 an	3 ans	5 ans	10 ans	35 ans
PIB en volume	(a)	1,02	1,24	1,32	0,79	0,06	1,03	1,26	1,35	0,74	-0,16
VA du secteur marchand	(a)	0,66	1,01	1,11	0,52	-0,02	0,67	1,03	1,14	0,47	-0,27
Consommation des ménages	(a)	0,09	0,66	1,06	0,96	0,33	0,10	0,71	1,16	1,15	0,60
Investissement	(a)	8,25	8,68	8,74	7,61	1,48	8,25	8,70	8,78	7,66	1,09
Investissement des SNF et EI	(a)	0,53	1,13	1,43	1,11	-0,20	0,54	1,16	1,47	1,13	-0,70
Exportations	(a)	-0,03	-0,21	-0,52	-1,63	-0,91	-0,03	-0,22	-0,59	-2,03	-1,92
Importations	(a)	0,89	1,42	1,74	1,77	0,41	0,89	1,45	1,81	1,99	0,59
Revenu disponible réel des ménages	(a)	0,14	0,82	1,11	0,87	0,31	0,16	0,88	1,22	1,06	0,57
Taux d'épargne	(b)	0,05	0,15	0,05	-0,08	-0,02	0,06	0,16	0,06	-0,08	-0,02
Prix à la consommation des ménages	(a)	0,26	0,88	1,72	3,89	1,08	0,27	0,96	1,96	5,06	2,47
Prix de production marchande	(a)	0,30	1,00	1,93	4,30	1,21	0,31	1,08	2,20	5,59	2,72
Prix des exportations	(a)	0,19	0,76	1,58	3,73	1,08	0,20	0,84	1,81	4,83	2,48
Prix des importations	(a)	0,08	0,34	0,70	1,65	0,49	0,09	0,37	0,79	2,13	1,12
Salaire réel net	(a)	0,05	0,69	1,30	1,65	0,14	0,08	0,83	1,62	2,51	0,23
Coût réel du travail	(a)	0,03	0,61	1,14	1,29	0,01	0,06	0,74	1,43	2,04	-0,02
Emploi salarié en milliers	(d)	127	275	324	206	5	128	277	326	183	-74
Taux de chômage	(b)	-0,50	-1,16	-1,45	-1,04	-0,01	-0,50	-1,17	-1,46	-0,95	0,33
Balance commerciale	(c)	-0,21	-0,31	-0,35	-0,33	-0,19	-0,21	-0,31	-0,35	-0,33	-0,31
Solde primaire	(c)	-0,87	-0,46	-0,31	-0,36	-0,07	-0,87	-0,46	-0,31	-0,40	-0,13
Emissions	(a)	0,50	1,06	1,41	1,43	0,31	0,50	1,10	1,50	1,67	0,47

(a) Écart relatif en % par rapport au scénario de référence (b) en points, (c) en % du PIB, (d) en milliers.

Source : ThreeME, calcul des auteurs.

l'horizon de 5 ans. Cela vient essentiellement de la perte de compétitivité qui entraîne une dégradation de la balance commerciale. À long terme, l'effet multiplicateur est nul tant dans le cas de la courbe WS que dans celui de la courbe de Phillips.

2.6. Comparaison entre ThreeME et MESANGE dans le cas d'une hausse du prix du pétrole de 20 % et d'une baisse permanente de 1 % du PIB des cotisations employeurs

Nous comparons ici les résultats de simulation obtenus par le modèle ThreeME avec ceux du modèle MESANGE de la Direction générale du Trésor et publiés dans Klein et Simon (2010). MESANGE est un modèle économétrique uni-sectoriel de l'économie française. Étant aussi d'inspiration néo-keynésienne, il est utile de tester dans quelle mesure les propriétés dynamiques et de long terme de ThreeME et de MESANGE sont comparables. On s'attend tout de même à des divergences parce que les deux modèles reposent sur des hypothèses et des choix de modélisation différents. MESANGE est un modèle trimestriel alors que ThreeME est annuel. MESANGE étant uni-sectoriel, les possibilités de substitution entre capital et énergie ou entre travail et énergie sont implicitement nulles. Il y a aussi d'autres différences substantielles de spécification de certaines équations-clés. Ainsi dans ThreeME, la demande d'investissement garantit que les entreprises atteignent leur niveau de stock de capital désiré à long terme et les phénomènes de substitution portent sur le stock de capital et non les flux d'investissement. MESANGE modélise directement une équation d'investissement en fonction de la valeur ajoutée du secteur sans cible de stock de capital à long terme, ce qui n'est pas cohérent avec la théorie de la fonction de production. La spécification de l'indice des prix à la consommation, des importations ou des exportations est comptable dans ThreeME, alors que c'est une relation économétrique dans MESANGE.

La courbe WS de MESANGE suppose que les salaires sont indexés à long terme sur les termes de l'échange intérieur (écart entre les prix à la consommation et de valeur ajoutée) et le coin fiscal : $(1 + TCSE)/(1 - TCSS)/(1 - TIR)$, où TCSE, TCSS et TIR sont respectivement les taux de cotisations employeurs, de cotisations salariés et d'impôt sur le revenu. Nous ne les retenons pas dans la version ThreeME STANDARD car cela soulève plusieurs problèmes.

L'inclusion du coin fiscal est critiquable car l'idée que les salariés demandent des hausses de salaires lorsque les cotisations employeurs (que les salariés ne paient pas) augmentent ne semble pas réaliste. Dans MESANGE, la négociation salariale porte sur le salaire brut dans la branche manufacturière alors qu'elle porte sur la rémunération salariale (y compris cotisations employeurs) pour la branche non manufacturière. Dans les deux cas, une indexation unitaire sur le coin fiscal est problématique. Dans le premier cas, il n'y a aucune raison que les syndicats obtiennent des hausses de salaires lorsque les cotisations employeurs augmentent. Au contraire, on s'attend à des baisses puisque les employeurs cherchent à répercuter la hausse de taux de cotisations sur les salaires pour limiter la hausse des coûts. C'est d'ailleurs ce que semble confirmer l'économétrie dans le cas de plusieurs pays européens dont la France (voir Chagny *et al.*, 2002). Dans le deuxième cas, l'impact d'une hausse des cotisations employeurs sur la rémunération salariale devrait être immédiat puisque c'est une relation comptable. Il est peu réaliste que la diffusion se fasse lentement dans le temps comme supposé dans MESANGE. Enfin il semble peu probable que l'impact des différents taux d'imposition soit homogène sur la rémunération salariale et indexé de manière unitaire comme cela est imposé dans MESANGE. D'ailleurs, l'étude économétrique de Tyrväinen (1995) rejetait une telle contrainte pour neuf pays de l'OCDE sur les dix estimés.

Néanmoins afin de faciliter la comparaison des résultats, nous avons retenu dans cette section les hypothèses de MESANGE et inclus les termes de l'échange intérieur et le coin fiscal dans l'équation de salaires. Malgré les différences entre les deux modèles, les ordres de grandeur concernant l'impact d'une hausse de 20 % des prix du pétrole dans ThreeME sont globalement proches de ceux de MESANGE pour plusieurs composantes du PIB. À 10 ans, les variations constatées par rapport au scénario de référence sont respectivement pour ThreeME et MESANGE de -0,35 % et -0,39 % pour le PIB, -0,74 % et -0,62 % pour la consommation des ménages ou -0,22 % et -0,38 % pour l'investissement. Cela se traduit par un impact sur l'emploi comparable (66 et 68 000 emplois détruits à 10 ans) avec toutefois un décalage dans la dynamique, le point haut étant à 10 ans pour ThreeME contre 5 ans pour MESANGE.

Tableau 9. Hausse permanente de 20 % du prix du pétrole, comparaison ThreeME
(avec une courbe WS qui intègre un coin fiscal-social et les termes de l'échange) versus MESANGE

Hausse permanente de 20 % des prix du pétrole		ThreeME STANDARD (WS)					MESANGE				
		1 an	3 ans	5 ans	10 ans	Long terme	1 an	3 ans	5 ans	10 ans	Long terme
PIB en volume	(a)	-0,09	-0,23	-0,31	-0,35	-0,32	-0,04	-0,25	-0,39	-0,39	-0,33
VA du secteur marchand	(a)	-0,07	-0,21	-0,29	-0,33	-0,30	-0,05	-0,30	-0,49	-0,49	-0,42
Consommation des ménages	(a)	-0,21	-0,53	-0,69	-0,74	-0,60	-0,09	-0,40	-0,59	-0,62	-0,66
Investissement	(a)	-0,01	-0,09	-0,16	-0,22	-0,07	-0,08	-0,33	-0,49	-0,38	-0,39
Investissement des SNF et EI	(a)	-0,01	-0,11	-0,20	-0,27	-0,07	-0,11	-0,42	-0,59	-0,54	-0,56
Exportations	(a)	-0,02	-0,07	-0,12	-0,21	-0,38	-0,01	-0,15	-0,24	-0,18	-0,05
Importations	(a)	-0,17	-0,46	-0,61	-0,70	-0,58	-0,11	-0,24	-0,32	-0,21	-0,32
Revenu disponible réel des ménages	(a)	-0,34	-0,59	-0,69	-0,71	-0,60	-0,14	-0,37	-0,55	-0,64	-0,66
Taux d'épargne	(b)	-0,13	-0,06	-0,01	0,03	0,00	-0,05	0,03	0,04	-0,01	0,00
Prix à la consommation des ménages	(a)	0,33	0,46	0,53	0,59	0,85	0,30	0,78	0,95	0,86	0,46
Prix de production marchande	(a)	0,13	0,26	0,34	0,39	0,67	0,06	0,47	0,64	0,54	0,11
Prix des exportations	(a)	0,20	0,40	0,51	0,59	0,83	0,05	0,37	0,50	0,37	0,12
Prix des importations	(a)	1,89	1,94	1,97	2,00	2,13	1,57	2,29	2,40	2,33	2,10
Salaire réel net	(a)	-0,49	-0,66	-0,75	-0,87	-0,78	-0,16	-0,31	-0,54	-0,80	-0,89
Coût réel du travail	(a)	-0,28	-0,46	-0,56	-0,68	-0,61	0,14	0,29	0,13	-0,15	-0,16
Emploi salarié en milliers	(d)	-6	-29	-49	-66	-66	-3	-53	-85	-68	-56
Taux de chômage	(b)	0,02	0,12	0,21	0,30	0,27	0,01	0,22	0,35	0,28	0,23
Balance commerciale	(c)	-0,44	-0,33	-0,28	-0,26	-0,31	-0,39	-0,52	-0,53	-0,59	-0,56
Solde primaire	(c)	-0,07	-0,23	-0,29	-0,32	-0,29	-0,03	-0,21	-0,31	-0,30	-0,29
Emissions	(a)	-0,94	-2,06	-2,56	-2,87	-2,71					

(a) Écart relatif en % par rapport au scénario de référence (b) en points, (c) en % du PIB, (d) en milliers.

Source : ThreeME, calcul des auteurs.

La dynamique inflationniste est plus forte dans MESANGE à moyen terme mais pas à long terme. Sur la base d'autres simulations (non montrées ici) nous avons constaté que les différences entre les deux modèles dépendent fortement de l'inclusion ou non des termes de l'échange. Sans son inclusion, la dynamique est plus forte dans ThreeME. Le fait que l'investissement résiste mieux dans ThreeME provient en partie des mécanismes de substitution entre l'énergie et le capital qui sont absent dans MESANGE.

Nous comparons également les résultats d'une baisse de 1 % de PIB des cotisations employeurs appliquée aux salariés du secteur privé (les APU sont exclues). Dans cette variante, nous essayons de nous rapprocher de la définition de l'équation de salaire dans MESANGE, comme mentionné précédemment, nous intégrons ici le coin fiscal, le terme de l'échange intérieur et le terme d'ouverture. Les résultats, présentés ci-dessous, restent comparables à ceux obtenus avec MESANGE à moyen et long-terme. En général, les amplitudes sont plus faibles dans ThreeME. Cela est dû à des effets expansionnistes sur la production et la consommation moins marqués. À 5 ans le prix à la consommation de ménages varie de -1,48 % en écart au sentier de référence dans ThreeME (resp. -1,68 % dans MESANGE). Le salaire réel net ne croît toutefois pas de la même manière malgré des effets sur les prix similaires dans les deux modèles. Le sens de variation est différent à court terme et son amplitude est presque trois fois moindre dans ThreeME à moyen et long terme. Cela peut s'expliquer par une prise en compte du coin fiscal différente sur le salaire brut. Elle est uniforme dans ThreeME, c'est-à-dire appliquée dans tous les secteurs d'activité alors que dans MESANGE, le coin fiscal intervient au niveau du salaire brut uniquement dans les branches manufacturières. Dans ThreeME, l'effet négatif du coin fiscal sur le salaire (baisse de salaire) l'emporte sur l'effet positif de la baisse du chômage (hausse de salaire) tandis que dans MESANGE le contraire apparaît. C'est ainsi que le salaire réel net baisse dans ThreeME alors qu'il augmente dans MESANGE. Cette différence est d'autant plus marquée que les ajustements dans MESANGE pour la courbe WS sont très lents. Afin de limiter cet effet, nous avons diminué dans cette variante la sensibilité des salaires au coin fiscal. Bien que réduite, la différence de salaire persiste dans les deux modèles. Nous obtenons ainsi à 5 ans un effet de +1,52 % sur le salaire réel

Tableau 10. Baisse permanente de 1 % du PIB des cotisations sociales employeurs, comparaison ThreeME (avec une courbe WS qui intègre un coin fiscal-social et les termes de l'échange) versus MESANGE

Baisse permanente de 1 % de PIB des cotisations employeurs		ThreeME (WS)					MESANGE				
		1 an	3 ans	5 ans	10 ans	Long terme	1 an	3 ans	5 ans	10 ans	Long terme
PIB en volume	(a)	0,04	0,27	0,52	0,90	0,77	0,25	0,87	1,06	1,18	1,43
VA du secteur marchand	(a)	0,01	0,21	0,48	0,91	0,76	0,30	1,03	1,29	1,44	1,75
Consommation des ménages	(a)	0,03	0,30	0,59	0,94	0,65	0,35	1,37	1,45	1,54	1,82
Investissement	(a)	-0,04	0,05	0,26	0,77	0,67	0,61	1,02	1,16	1,10	1,46
Investissement des SNF et EI	(a)	0,00	0,17	0,47	1,15	1,08	0,84	0,95	1,18	1,17	1,71
Exportations	(a)	0,07	0,33	0,63	1,21	1,29	0,07	0,53	0,70	0,75	0,79
Importations	(a)	-0,03	0,05	0,18	0,40	0,26	0,37	0,93	0,77	0,49	0,52
Revenu disponible réel des ménages	(a)	0,04	0,39	0,66	0,91	0,65	0,40	1,16	1,37	1,54	1,82
Taux d'épargne	(b)	0,02	0,08	0,06	-0,02	0,00	0,04	-0,17	-0,07	0,01	0,00
Prix à la consommation des ménages	(a)	-0,34	-0,97	-1,48	-2,14	-1,91	-0,24	-1,27	-1,61	-1,93	-1,98
Prix de production marchande	(a)	-0,48	-1,24	-1,81	-2,51	-2,26	-0,31	-1,42	-1,79	-2,14	-2,21
Prix des exportations	(a)	-0,41	-1,09	-1,62	-2,31	-2,10	-0,24	-1,15	-1,32	-1,40	-1,44
Prix des importations	(a)	-0,21	-0,54	-0,79	-1,11	-1,01	-0,11	-0,67	-0,88	-1,08	-1,27
Salaire réel net	(a)	-0,08	-0,10	0,00	0,44	0,46	0,37	1,21	1,52	1,95	2,43
Coût réel du travail	(a)	-1,66	-1,54	-1,38	-0,89	-0,91	-2,12	-1,42	-1,01	-0,45	0,01
Emploi salarié en milliers	(d)	11	63	129	248	244	84	265	268	257	276
Taux de chômage	(b)	-0,04	-0,26	-0,55	-1,11	-0,99	-0,35	-1,09	-1,09	-1,05	-1,13
Balance commerciale	(c)	-0,03	-0,08	-0,12	-0,13	-0,03	-0,12	-0,24	-0,14	-0,01	0,05
Solde primaire	(c)	-0,13	-0,15	-0,07	0,10	0,03	-0,84	-0,32	-0,30	-0,30	-0,18
Emissions	(a)	-0,03	0,08	0,24	0,51	0,38					

(a) Écart relatif en % par rapport au scénario de référence (b) en points, (c) en % du PIB, (d) en milliers.

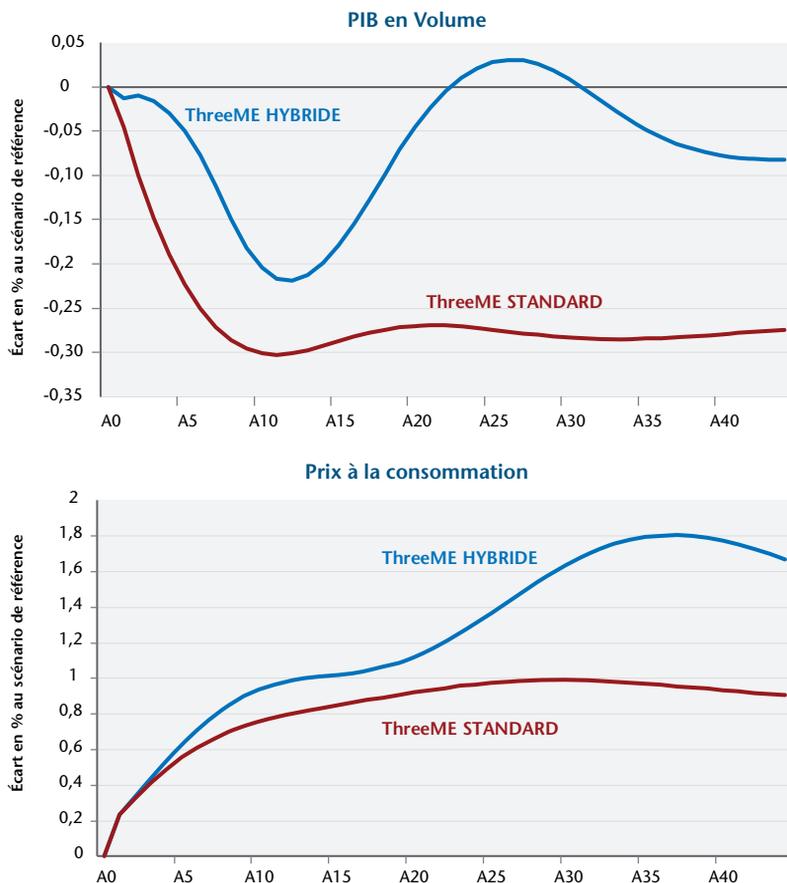
Source : ThreeME, calcul des auteurs.

net dans MESANGE alors qu'il est nul dans ThreeME (voir tableau 10). Mais est de -0,60 % dans la variante où la sensibilité des salaires au coin fiscal n'est pas modifiée dans ThreeME (non montrée ici).

2.7. Comparaison des versions standard et hybride dans le cas d'une hausse de 10 % des prix du pétrole et du gaz

Nous comparons enfin les résultats d'une hausse du prix du pétrole et du gaz simulés avec la version standard et avec la version hybride. Le graphique 6 montre que l'impact est moins récessif à moyen comme à long terme avec la version hybride qui inclut une

Graphique 6. Hausse de 10 % des prix du pétrole et du gaz, version hybride versus version standard



Source : ThreeME, calcul des auteurs.

représentation plus fine des comportements énergétiques des ménages. Dans les deux cas, le choc initial inflationniste est le même. Au-delà de 5 ans, la dynamique inflationniste est plus forte dans le cas hybride du fait que l'activité y est moins détériorée. D'ailleurs, le taux de chômage augmente plus faiblement et reste quasi stable les trois premières années (voir tableau 11). Dans la version standard, le chômage augmente dès la première année.

Dans les deux versions la consommation baisse car le revenu disponible réel baisse. Le choc est moins récessif dans la version hybride car la consommation baisse moins. Elle est même positive à long terme. Cela s'explique par la hausse des travaux de rénovation énergétique et par la hausse du transport collectif qui apparaît seulement dans la version hybride (voir tableau 12). Dans la version standard, tous les biens et services sont substituables avec une élasticité de substitution unitaire. Les secteurs intensifs en pétrole et gaz voient leurs prix augmenter relativement plus que les secteurs moins intensifs. Cela explique pourquoi la consommation de certains biens baisse plus que la moyenne. Alors que la consommation totale baisse de 0,53 % à 10 ans, la baisse est supérieure pour les secteurs de l'industrie chimique minérale (0,60 %) et organique (1 %), des transports routier de voyageurs (0,7 %), de marchandises (0,8 %) et aériens (0,6 %). Les baisses les plus importantes provenant logiquement des secteurs du pétrole (3,2 %) et du gaz (2,8 %).

Dans la version hybride, la consommation énergétique des ménages n'est pas substituée avec tous les autres biens mais seulement avec l'investissement dans le bâtiment (rénovation énergétique) et dans l'automobile (achat de voitures plus sobres). Par ailleurs la hausse du prix du pétrole encourage le développement des transports collectifs au détriment de l'automobile. Alors que la consommation totale baisse de 0,26 % à 10 ans, les secteurs du bâtiment, des transports ferroviaires et de voyageurs augmentent respectivement de 0,2 %, 0,1 % et 0,2 %. Pour l'automobile, la consommation diminue car les investissements en voitures sobres sont insuffisants pour compenser le transfert modal.

Tableau 11. Hausse permanente de 10 % du prix du pétrole et du gaz, comparaison version Hybride versus Standard

Hausse permanente de 10 % des prix du pétrole et du gaz		ThreeME HYBRIDE (WS)					ThreeME STANDARD (WS)				
		1 an	3 ans	5 ans	10 ans	35 ans	1 an	3 ans	5 ans	10 ans	35 ans
PIB en volume	(a)	-0,01	-0,02	-0,05	-0,20	-0,05	-0,05	-0,15	-0,22	-0,30	-0,28
VA du secteur marchand	(a)	0,00	-0,01	-0,05	-0,22	0,05	-0,03	-0,13	-0,21	-0,30	-0,28
Consommation des ménages	(a)	-0,05	-0,05	-0,09	-0,26	0,30	-0,11	-0,33	-0,45	-0,53	-0,39
Investissement	(a)	0,01	0,04	0,04	-0,08	0,17	0,00	-0,05	-0,10	-0,20	-0,14
Investissement des SNF et EI	(a)	0,02	0,05	0,04	-0,11	0,19	0,00	-0,06	-0,13	-0,25	-0,17
Exportations	(a)	-0,02	-0,08	-0,17	-0,41	-0,98	-0,01	-0,07	-0,15	-0,30	-0,49
Importations	(a)	-0,07	-0,12	-0,16	-0,27	0,05	-0,10	-0,29	-0,40	-0,48	-0,38
Revenu disponible réel des ménages	(a)	-0,18	-0,32	-0,35	-0,38	-0,05	-0,18	-0,38	-0,47	-0,51	-0,39
Taux d'épargne	(b)	-0,12	-0,25	-0,25	-0,12	-0,33	-0,07	-0,04	-0,01	0,02	0,00
Prix à la consommation des ménages	(a)	0,23	0,44	0,63	0,94	1,79	0,23	0,42	0,56	0,76	0,97
Prix de production marchande	(a)	0,13	0,36	0,58	0,94	1,91	0,13	0,32	0,47	0,69	0,91
Prix des exportations	(a)	0,18	0,43	0,65	0,99	1,85	0,18	0,40	0,57	0,78	0,99
Prix des importations	(a)	1,38	1,44	1,49	1,57	1,78	1,39	1,46	1,53	1,63	1,73
Salaire réel net	(a)	-0,24	-0,28	-0,25	-0,29	-0,01	-0,24	-0,33	-0,38	-0,49	-0,46
Coût réel du travail	(a)	-0,14	-0,20	-0,20	-0,30	-0,14	-0,14	-0,23	-0,30	-0,42	-0,41
Emploi salarié en milliers	(d)	0	-1	-7	-43	-16	-3	-19	-37	-63	-67
Taux de chômage	(b)	0,00	0,00	0,03	0,19	0,06	0,01	0,08	0,16	0,28	0,28
Balance commerciale	(c)	-0,33	-0,27	-0,24	-0,20	-0,24	-0,32	-0,24	-0,20	-0,19	-0,24
Solde primaire	(c)	-0,03	-0,10	-0,12	-0,19	-0,08	-0,05	-0,17	-0,22	-0,26	-0,23
Emissions	(a)	-0,29	-0,79	-1,18	-1,65	-2,98	-0,59	-1,42	-1,82	-2,10	-1,97

(a) Écart relatif en % par rapport au scénario de référence (b) en points, (c) en % du PIB, (d) en milliers.

Source : ThreeME, calcul des auteurs.

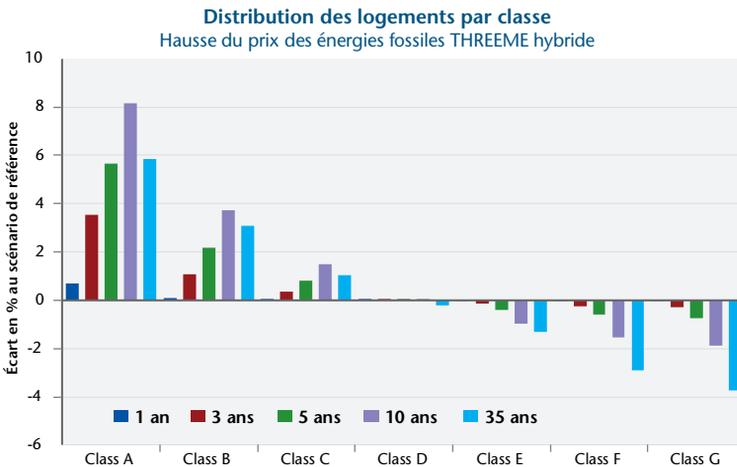
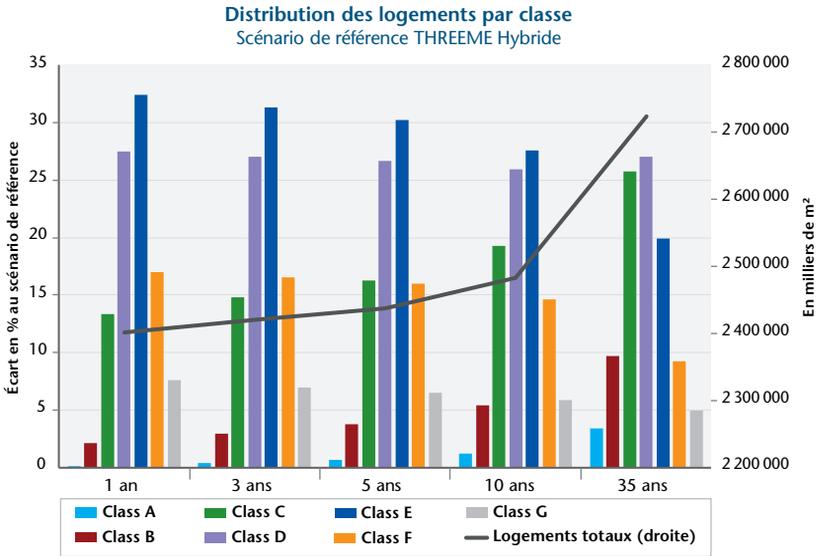
Tableau 12. : Hausse permanente de 10 % du prix du pétrole et du gaz, consommation des ménages, comparaison version Hybride

CONSOMMATION		ThreeME HYBRIDE					ThreeME STANDARD				
		1 an	3 ans	5 ans	10 ans	35 ans	1 an	3 ans	5 ans	10 ans	35 ans
Industrie et Agriculture	Consommation totale	-0,05	-0,05	-0,09	-0,26	0,30	-0,11	-0,33	-0,45	-0,53	-0,39
	Agriculture, sylviculture et pêche	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	-0,01	0,00
	Industrie agro-alimentaire	-0,01	-0,06	-0,10	-0,29	0,56	-0,06	-0,24	-0,36	-0,45	-0,31
	Automobile	-0,61	-0,19	-0,08	-0,08	0,04	-0,05	-0,20	-0,30	-0,35	-0,19
	Fabrication de verre et d'articles en verre	-0,01	-0,08	-0,13	-0,30	0,59	-0,07	-0,26	-0,38	-0,46	-0,31
	Fabrication de produits céramiques	-0,02	-0,08	-0,13	-0,29	0,61	-0,07	-0,25	-0,38	-0,45	-0,30
	Papier et carton	-0,01	-0,07	-0,11	-0,27	0,66	-0,06	-0,25	-0,37	-0,45	-0,29
	Industrie chimique minérale	-0,04	-0,14	-0,22	-0,38	0,59	-0,09	-0,33	-0,48	-0,57	-0,39
	Industrie chimique organique	-0,13	-0,41	-0,55	-0,69	0,45	-0,19	-0,62	-0,88	-0,99	-0,75
	Transformation des matières plastiques	-0,01	-0,08	-0,12	-0,25	0,79	-0,07	-0,26	-0,40	-0,47	-0,27
	Production de métaux non ferreux	0,00	-0,01	-0,01	-0,10	0,92	-0,05	-0,19	-0,28	-0,31	-0,13
	Autres industries	0,00	-0,03	-0,05	-0,19	0,74	-0,06	-0,21	-0,31	-0,37	-0,21
	BTP	0,06	0,37	0,48	0,23	-0,15	-0,06	-0,23	-0,35	-0,43	-0,30
Transport	Transports ferroviaires	0,09	0,13	0,13	0,13	0,07	-0,06	-0,23	-0,34	-0,42	-0,31
	Transport routier de voyageurs	0,15	0,24	0,24	0,24	0,12	-0,12	-0,41	-0,61	-0,74	-0,61
	Transport routier (ou par conduites) de marchandises	-0,08	-0,28	-0,41	-0,61	0,30	-0,13	-0,46	-0,66	-0,78	-0,60
	Transports par eau	-0,03	-0,11	-0,15	-0,29	0,71	-0,08	-0,29	-0,42	-0,49	-0,32
	Transports aériens	-0,40	-0,50	-0,52	-0,50	-0,42	-0,11	-0,39	-0,56	-0,65	-0,46
Service	Services marchands	-0,01	-0,04	-0,08	-0,27	0,52	-0,06	-0,22	-0,33	-0,40	-0,28
	Services non marchands	0,00	-0,02	-0,06	-0,25	0,52	-0,05	-0,20	-0,30	-0,36	-0,24
Energie	Extraction et agglomération de la houille (Charbon)	-0,02	-0,21	-0,55	-1,41	-2,60	-0,05	-0,18	-0,25	-0,23	0,00
	Raffinage et distribution de pétrole	-0,42	-1,00	-1,50	-2,15	-11,00	-1,32	-2,66	-3,09	-3,16	-2,80
	Production et distribution d'électricité	0,14	0,18	0,14	-0,03	0,26	-0,06	-0,22	-0,33	-0,41	-0,29
	Production et distribution de gaz	-0,40	-0,97	-1,33	-2,03	-2,84	-0,71	-1,97	-2,57	-2,82	-2,47

(a) Écart relatif en % par rapport au scénario de référence (b) en points, (c) en % du PIB, (d) en milliers.

Source : ThreeME, calcul des auteurs.

Graphique 7. Hausse de 10 % des prix du pétrole et du gaz, version hybride : distribution des logements par classe

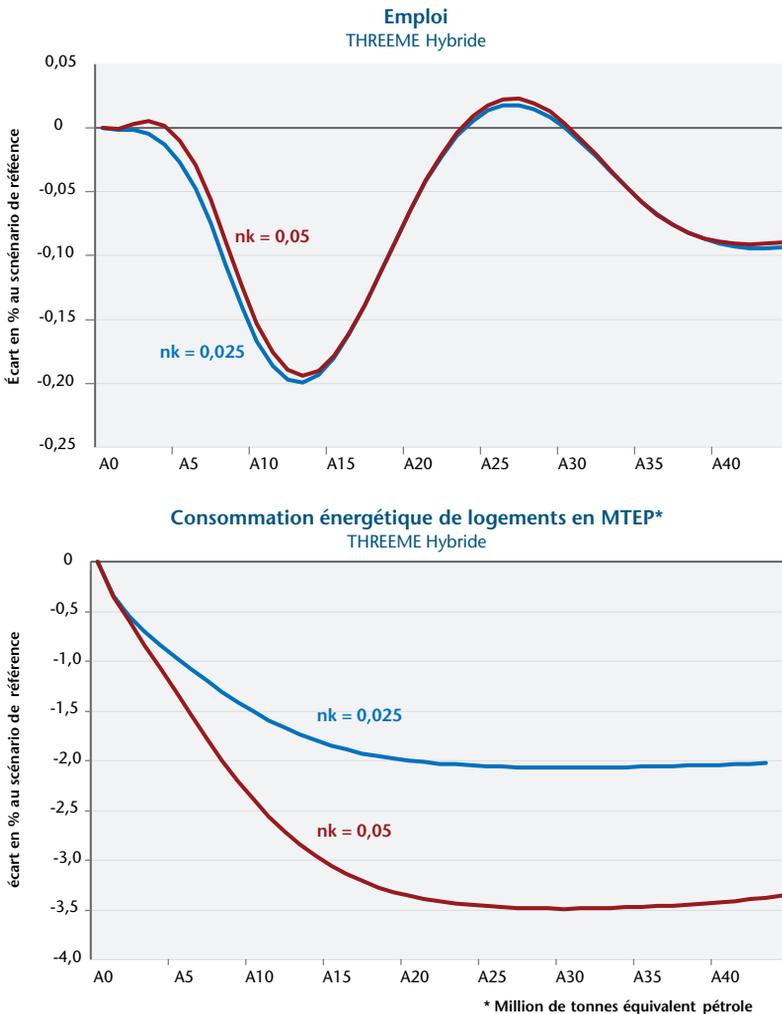


Source : ThreeME, calcul des auteurs.

La comparaison des évolutions des émissions de CO₂ et de la consommation en pétrole et gaz des ménages entre les deux versions du modèle donne des enseignements intéressants. À court et moyen terme, la chute de ces consommations et des émissions est plus importante avec la version standard. Cela s'explique par deux raisons. La baisse de l'activité est plus forte dans la version

standard mais surtout les substitutions des ménages y sont plus importantes à court terme, l'énergie étant substituable à tous les autres biens car non soumise à des contraintes physiques ou temporelles. Dans la version hybride, au contraire, les mécanismes de substitution entre énergie et bâtiment dépendent des contraintes techniques (durée de vie des logements, taux de destruction, nombre de nouveau logement, etc.) liées au renouvellement du parc immobilier et qui induisent un ajustement plus lent.

Graphique 8. Hausse de 10 % des prix du pétrole et du gaz, version hybride : selon l'élasticité de réhabilitation au temps de retour de l'investissement (nk) (cf. eq. 25)



Source : ThreeME, calcul des auteurs.

Par contre, à long terme la baisse de la consommation de pétrole et de gaz et des émissions est plus importante dans la version hybride (voir tableau 11 et 12). C'est particulièrement vrai pour le pétrole (-10,9 % dans la version hybride contre -2,8 % dans la version standard). Cela provient du fait que dans la version hybride, la spécification de l'investissement des ménages impose un phénomène d'irréversibilité. Comme le montre le graphique 7, la modification des propriétés énergétiques du parc immobilier est durable. Dans le cas standard, la consommation énergétique repart à la hausse, même si le prix relatif du pétrole (et du gaz) par rapport aux autres prix a tendance à diminuer à long terme. C'est ce qui se passe au-delà de 10 ans du fait des mécanismes de convergence du modèle. Ainsi le point bas de la consommation de pétrole est atteint la dixième année dans la version standard, tandis que la baisse se poursuit dans la version hybride.

3. Conclusion

Cet article présente une analyse des propriétés dynamiques et de long terme du modèle ThreeME. Plusieurs variantes ont été présentées : une hausse du prix du pétrole, une baisse des cotisations employeurs, une hausse de la TVA, une hausse des investissements publics et l'introduction d'une taxe carbone. Pour chacune d'entre elles, nous présentons l'impact de la spécification de l'équation de salaire (en comparant les résultats simulés avec une courbe WS et de Phillips. Nous comparons aussi pour certaines variantes les résultats de ThreeME avec ceux du modèle MESANGE ainsi que deux versions de ThreeME (version standard et hybride). Plusieurs enseignements peuvent être tirés de cet exercice :

- Quel que soit le choc, les résultats à moyen terme (horizon de 10 ans) sont très similaires entre les courbes WS et de Phillips. Par contre, le long terme des deux modèles diffère substantiellement. On retrouve les résultats mis en avant par plusieurs études sur le taux de chômage d'équilibre (voir e. g. L'Horty et Thibault, 1998 ; Blanchard et Katz, 1999 ; Chagny *et al.*, 2002). Une hausse du prix du pétrole, de la fiscalité sur la consommation ou des cotisations sociales employeurs entraîne une hausse permanente du chômage dans le cas

d'une courbe WS mais reste transitoire avec une courbe de Phillips ;

- Malgré des différences de spécifications et d'approches, les résultats de ThreeME sont relativement proches du modèle économétrique et uni-sectoriel MESANGE. Malgré la différence de pas (trimestriel pour MESANGE, annuel pour ThreeME), la dynamique est similaire suggérant que les ajustements calibrés dans ThreeME approchent raisonnablement la dynamique estimée économétriquement. Une différence notable concerne la dynamique inflationniste qui s'explique sans doute essentiellement par deux éléments : (1) MESANGE est uni-sectoriel alors que ThreeME est multi-sectoriel ; (2) certaines équations de prix sont comptables dans ThreeME alors qu'elles sont estimées économétriquement dans MESANGE (e. g. le prix de consommation⁶). La similitude des résultats conforte l'approche que nous avons retenue car elle est moins coûteuse qu'une approche économétrique et ceci d'autant plus dans un cadre multisectoriel ;
- Nous montrons aussi la différence de résultats obtenus entre une spécification standard des comportements de consommation des ménages et une spécification dite hybride qui modélise plus finement le transport et le bâtiment ainsi que les consommations énergétiques associées. En utilisant l'exemple d'une hausse du pétrole, nous montrons que, malgré son degré de complexité supérieur, l'approche hybride a certains avantages. En reliant les consommations énergétiques à leur usage, elle donne un impact plus précis au niveau sectoriel des phénomènes de substitution liés à l'énergie. En particulier, la quantification de l'effet sur le bâtiment semble plus réaliste. Cela a un effet notable au niveau agrégé en affichant un impact généralement moins récessif d'une hausse des prix de l'énergie.

6. Le prix à la consommation dans ThreeME est une moyenne pondérée du prix des imports et du prix à la production.

Références

- Annicchiarico B. et F. Di Dio, 2015, « Environmental policy and macroeconomic dynamics in a new Keynesian model », *Journal of Environmental Economics and Management*, 69(1) : 1-21, <http://doi.org/10.1016/j.jeem.2014.10.002>
- Armington P. S., 1969, « A Theory of Demand for Products Distinguished by Place of Production », *International Monetary Fund Staff Papers*, 16(1) : 159-178, <http://doi.org/10.2307/3866403>
- Benassy J.-P., 1975, « Neo-Keynesian Disequilibrium Theory in a Monetary Economy », *The Review of Economic Studies*, 42(4) : 503, <http://doi.org/10.2307/2296791>
- Benassy J.-P., 1976, « Théorie du déséquilibre et fondements micro-économiques de la macroéconomie », *Revue Économique*, 27 (Méthodes de l'analyse économique. Développements récents), 755-804.
- Blanchard O. et L.F. Katz, 1999, « Wage dynamics: Reconciling theory and evidence », *American Economic Review*, 89(2) : 69-74, <http://doi.org/10.1257/aer.89.2.69>
- Boitier B., A. Fougeyrollas, L. Nicolas, P. Le Mouël et P. Zagamé, 2011, SoA:NEMESIS First Draft Scenario and Stock-Tacking Exercise. Neujobs State of the Art Report N°4/D9.1. Paris.
- Bovenberg A. L., et R. A. De Mooij, 1994, « Environmental Levies and Distortionary Taxation », *American Economic Review*, 84(4) : 1085-1089.
- Brown M. et D. Heien, 1972, « The S-Branch Utility Tree: A Generalization of the Linear Expenditure System », *Econometrica*, 40(4) : 737-747. <http://doi.org/10.2307/1912967>
- Callonnet G., G. Landa, P. Malliet, F. Reynès et Y. Tamsamani, 2013, « A Full Description of the THREEME Model: Multi-sector Macroeconomic Model for the Evaluation of Environmental and Energy policy », Retrieved from www.ofce.sciences-po.fr/indic&prev/modele.htm
- Callonnet G., F. Reynès, et Y. Tamsamani, 2011, « Une évaluation macroéconomique et sectorielle de la fiscalité carbone en France », *Revue de l'OFCE*, 120, 123-154.
- Cambridge Econometrics, 2014, E3ME Technical Manual, Version 6.0, April 2014.
- Capro P., D. Van Regemorter, L. Paroussos, et P. Karkatsoulis, 2013, Manual of GEM-E3.
- Center for Global Trade Analysis – GTAP, 2014, GTAP Models: Current GTAP Model.
- Chagny O., F. Reynès, et H. Sterdyniak, 2002, « Le taux de chômage d'équilibre-Discussion Théorique et évaluation empirique », *Revue de l'OFCE*, 81.
- Château J., R. Dellink, et E. Lanzi, 2014, « An overview of the OECD ENV-Linkages Model: Version 3 », OECD, *Environment Working Papers*, 65, (65). <http://doi.org/10.1787/5jz2qck2b2vd-en>

- Chauvin V., G. Dupont, É. Heyer, M. Plane et X. Timbeau, 2002, « Le modèle France de l'OFCE. La nouvelle version? : *e-mod.fr* » *Revue de l'OFCE*, 81, <http://doi.org/10.3917/reof.081.0245>
- Dixon P. et D. W. Jorgenson, (Eds.), 2013, *Handbook of Computable General Equilibrium Modeling*. North Holland.
- Ducoudré B., M. Plane, S. Villemot, 2015, Équations d'Investissement : une comparaison internationale dans la crise. *Revue de l'OFCE*, 138.
- Économie et Prévision, 1998, « Structures et propriétés de cinq modèles macroéconomiques français », *Économie et Prévision*, 134, 1-70.
- ERASME, (n.d.-a). The NEMESIS Reference Manual PART I.
- ERASME, (n.d.-b). The NEMESIS Reference Manual PART I and II.
- Fishbone L. G., et H. Abilock, 1981, « Markal, a Linear-Programming Model for Energy-Systems Analysis - Technical Description of the Bnl Version ». *International Journal of Energy Research*, 5(4) : 353-375. <http://doi.org/10.1002/er.4440050406>
- Heaps C., 2008, « An introduction to LEAP », *Stockholm Environment Institute*, 1-16. Retrieved from <http://www.leap2000.org/documents/LEAPIntro.pdf>
- Heyer É., F. Reynès, et H. Sterdyniak, 2007, « Structural and reduced approaches of the equilibrium rate of unemployment, a comparison between France and the United States », *Economic Modelling*, 24(1) : 42-65. <http://doi.org/10.1016/j.econmod.2006.06.005>
- Hosoe N., K. Gasawa, et H. Hashimoto, 2010, « Textbook of computable general equilibrium modelling: programming and simulations », New York : St Martin's Press, *Palgrave Macmillan*, 19, 235, <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Klein C. et O. Simon, 2010, *Le modèle MESANGE : nouvelle version ré-estimé en base 2000*, <https://www.tresor.economie.gouv.fr/file/326046>
- L'Horty Y., et F. Thibault, 1998, « Le chômage d'équilibre de quoi parlons-nous ? », *Revue Française d'Économie*, 13, 51-81.
- Laitner J. A. et D. A. Hanson, 2006, Modeling detailed energy-efficiency technologies and technology policies within a CGE framework, *The Energy Journal*, 27, 151-169, <http://doi.org/10.2307/23297050>
- Lancaster K. J., 1966a, « A new approach to consumer theory », *Journal of Political Economy*, 74(2) : 132-157, <http://www.jstor.org/stable/1828835>
- Lancaster K. J., 1966b, « Change and Innovation in the Technology of Consumption », *American Economic Association*, 56(1) : 14-23. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/1821263>
- Landa Rivera G., F. Reynès, I. Islas Cortes, F. X. Bellocq, et F. Grazi, 2016, « Towards a low carbon growth in Mexico: Is a double dividend possible? A dynamic general equilibrium assessment », *Energy Policy*, 96, <http://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.06.012>

- Layard R., S. Nickell, et R. Jackman, 1991, Un employment: macroeconomic performance and the labour market, <http://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199279166.001.0001>
- Le Bihan H., et H. Sterdyniak, 1998, « Courbe de Phillips et modèle WS-PS. Quelques réflexions », *Revue Économique*, 49(3) : 937-948, <http://doi.org/10.2307/3502822>
- Lutz C., B. Meyer, M. I. Wolter, 2010, « The global multisector/multicountry 3-E model GINFORS. A description of the model and a baseline forecast for global energy demand and CO2 emissions », *International Journal of Global Environmental Issues*, 10(1/2) : 25-45 <http://doi.org/10.1504/IJGENVI.2010.030567>
- Malinvaud E., 1977, « The theory of unemployment reconsidered », *Basil Blackwell*, Oxford.
- Malinvaud, E., 1983, *Essai sur la théorie du chômage*, Calmann-Lévy.
- Oliner S., G. Rudebusch et D. Sichel, 1995, « New and Old Models of Business Investment?: A Comparison of Forecasting Performance », *Journal of Money, Credit and Banking*, 27(3) : 806-826. <http://doi.org/10.2307/2077752>
- Reynès F., 2010, The Phillips curve as a more general model than the Wage Setting curve.
- Reynès F., 2011, The Cobb-Douglas function as an approximation of other functions. OFCE, (IVM). Retrieved from <http://www.ofce.sciences-po.fr/pdf/dtravail/WP2011-21.pdf>
- Shoven J. B., et J. Whalley, 1994, « Applying General Equilibrium », *Economica*, 61(242) : 255. <http://doi.org/10.2307/2554963>
- Smets F., et R. Wouters, 2003, « An estimated dynamic stochastic general equilibrium model of the euro area », *Journal of the European Economic Association*, 1(5) : 1123-1175. <http://doi.org/10.1162/154247603770383415>
- Solow R. M., 1956, « A contribution to the theory of economic growth », *The Quarterly Journal of Economics*, 70(1) : 65-94, <http://doi.org/10.2307/1884513>
- Tyrväinen T., 1995, « Real wage resistance and unemployment: multivariate analysis of cointegrating relations in 10 OECD countries ». *OECD Jobs, Study Working Papers*, (10).