

Résumé long

Introduction

Le travail de thèse, résumé ici, s'est largement déroulé dans le contexte de préparation de la 21^{ème} Conférence des Parties (COP) en décembre 2015 à Paris marquant la fin d'un changement progressif de paradigme de la négociation-climat. Ce tournant, entamé à Cancun ([Hourcade et al., 2015](#)), s'est concrétisé par la signature de l'*Accord de Paris*. Le cœur de cet accord ne repose plus sur l'allocation d'un budget carbone, par pays, et la mise en place d'un marché carbone, pour respecter un objectif donné de stabilisation des températures (+2°C), mais sur des contributions climats volontaires à l'échelle nationale (NDCs).

Au lieu d'une approche *top-down* de répartition d'un droit à polluer, on adopte une démarche *bottom-up* où les gouvernements élaborent leurs propres plans de transition vers une économie bas carbone ; à charge pour la communauté internationale de mettre en place des mécanismes de collaboration, en particulier sur le plan financier, pour faciliter leur mise en œuvre et renforcer leur ambition. Ainsi, en France, la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte¹ définit les objectifs à atteindre pour les décennies à venir. La Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) et la Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) proposent les leviers sectoriels envisageables pour les atteindre.

Ce changement de paradigme a des implications pour la modélisation hybride énergie-économie-environnement (E3) en tant qu'outils d'aide à la décision. En effet, jusqu'alors, on pouvait s'appuyer sur des modèles mondiaux décrivant l'émergence d'un prix unique du carbone, et de son impact macro-économique global, pour différentes clés de répartition des droits d'émissions. Malgré une description plutôt agrégée des différents acteurs économiques, les modèles ont dû, peu à peu, intégrer de façon plus fine les contraintes techniques qui pèsent sur l'adaptation de ces acteurs. En effet, le maniement juxtaposé des modèles d'équilibre général calculable et des modèles technico-économiques ne permet pas d'analyser de façon suffisamment précise l'influence de ces contraintes sur les marges de manœuvres réellement disponibles ni pour le système productif (constance des élasticités de la fonction de production),

¹Publiée au Journal Officiel du 18 août 2015.

ni pour les consommateurs (rigidités dues à la réalité des équipements et des infrastructures). Cela a débouché sur plusieurs essais autour de la modélisation hybride (Hourcade et al., 2006) dont la thèse de Lefèvre (2016) en propose une synthèse. L'enjeu scientifique est de poursuivre cette évolution puisqu'il faut désormais être en mesure de représenter l'articulation entre des politiques sectorielles à un niveau plus fin, des standards et des réglementations techniques, et des pratiques tarifaires spécifiques au contexte institutionnel d'un pays. Cette description est décisive pour comprendre la réalité des enjeux de compétitivité et d'acceptabilité sociale des mesures climatiques.

L'essentiel des travaux de cette thèse porte donc sur la modélisation hybride en repartant de son principe de base : une description duale de l'économie, en valeur et en quantités physiques, nécessaire pour obtenir un dialogue maîtrisé entre modèles d'ingénieurs et modèles économiques. Elle prend comme cas d'étude le modèle IMACLIM. Que cela soit dans sa version mondiale ou nationale, de nombreuses thèses au CIRED ont contribué à repousser les défis méthodologiques pour rendre le modèle plus apte à l'étude de scénarios pour l'atténuation au changement climatique.

Nous nous appuyons sur la version nationale du modèle, IMACLIM-S FRANCE, qui permet d'étudier les NDCs tout en prenant précisément en compte les spécificités du pays (fiscalité, situation sociodémographique, etc.). Au commencement de la thèse, le modèle se déclinait en une version française et une brésilienne. Nous sommes parti du double-constat suivant :

- sur la technique : chaque version d'IMACLIM-S est développée séparément. L'existence d'une plateforme commune faciliterait l'extension de la capacité de modélisation.
- sur les méthodes : des points doivent être éclaircis et discutés, que cela soit sur la justification du traitement des données, le niveau de représentation sectoriel utilisé, ou la façon de modéliser différentes visions du monde (ouverture au commerce international, formation des salaires).

Bien que la thèse prenne comme fil directeur les questions clés autour de l'analyse des politiques climatiques (impact de la hausse des coûts du carbone sur la compétitivité, les revenus, l'emploi, etc.), sa contribution est essentiellement méthodologique. Le but est d'abord de souligner l'importance des techniques d'élaboration d'une comptabilité duale. Il s'agit ensuite de montrer comment un paramétrage controversé peut être utilisé pour établir un dialogue entre les différents acteurs économiques, et ce à plusieurs échelles de granularité : d'un niveau macro (impacts sur l'emploi, la dette, etc.) à un niveau plus fin (secteurs industriels). C'est pourquoi les travaux proposent des tests numériques balayant de larges intervalles de comportements pour mettre en évidence les principaux mécanismes à l'œuvre dans l'économie réelle, et comprendre les interactions entre plusieurs paramètres incertains (élasticités des échanges extérieurs, courbe salaire-chômage).

Chapitre 1 - La procédure d'hybridation

La description duale met en cohérence des flux physiques (par exemple les bilans énergétiques) et des flux monétaires sous forme de "matrices hybrides". Nous regroupons ce travail de traitement des données sous le nom de "procédure d'hybridation".

Différentes procédures d'hybridation existent pour obtenir une description duale de l'économie mondiale (Mcdougall and Lee, 2006; Rutherford and Paltsev, 2000; Sands et al.) avec différentes hypothèses pour retrouver une cohérence comptable².

La procédure développée pour la plateforme de modélisation IMACLIM -pays s'attache à préserver l'information statistique la plus pertinente pour l'analyse énergie-économie-environnement. De fait, elle préserve la taille de l'économie ainsi que celles des grands agrégats monétaires fournis par la comptabilité nationale (valeur ajoutée, etc.), et elle intègre des données sectorielles en quantité physique, et en prix, selon le niveau de détail souhaité.

Concrètement, la procédure IMACLIM se résume en deux étapes principales schématisées par la Figure 1. La première étape consiste à réorganiser les données de statistiques physiques (bilan énergétique en Mtep, production en tonne d'acier et de ciment) et les prix dans un format "entrées-sorties" compatible avec celui des comptes nationaux (harmonisation des nomenclatures, ventilation des usages et des ressources). Dans une deuxième étape, le tableau des factures de "matières" (en euros), reconstitué par le produit terme-à-terme des tableaux en volumes et en prix, remplace les factures du Tableau Entrées-Sorties (TES) de la comptabilité nationale. Ces factures ne sont spontanément pas cohérentes, et les écarts sont reportés en dehors de la description des flux physiques, sur le bien composite. Cette dernière étape permet de ne changer ni le niveau de richesse économique (*PIB*), ni l'ensemble des informations issues des statistiques spécifiques, et de reporter tous les ajustements sur un agrégat d'activités non critique pour la transition énergétique.

La procédure a été initialement développée pour les bilans énergétiques afin d'articuler les modèles macroéconomiques avec des modèles *technico-économiques* décrivant les systèmes énergétiques. Par rapport aux travaux antérieurs, nous franchissons une étape supplémentaire pour étendre la méthodologie à d'autres flux physiques, à savoir l'acier et le ciment. La méthode nous permet de reconstituer une représentation duale, en unités physiques et en monnaie, pour ces secteurs, initialement regroupés dans des agrégats sectoriels (métallurgie et minéraux non métalliques).

La méthode a été appliquée à l'économie française pour l'année 2010, en considérant 15 produits

²Dans le manuscrit, nous comparons notre méthode à celle du modèle SGM, mais nous ne présentons pas cette dernière dans ce résumé.

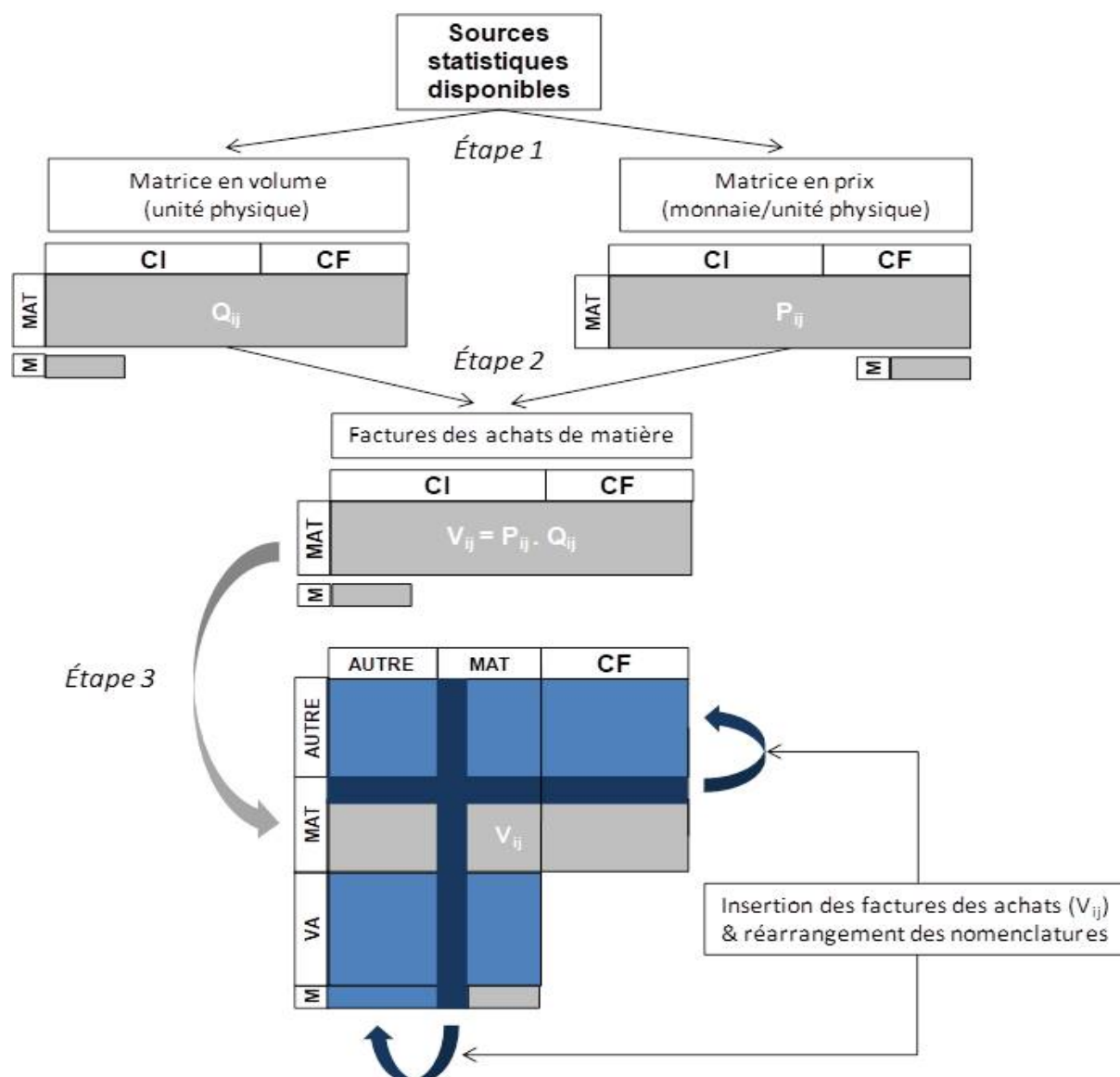


FIGURE 1 – Procédure d’hybridation pour IMACLIM

énergétiques³, et 12 secteurs industriels⁴.

La procédure d'hybridation change considérablement la description initiale de notre économie dont la taille globale reste pourtant la même, nous l'avons vu.

Dans un premier temps, nous montrons que la méthode corrige la taille et la répartition du secteur énergétique (agrégé) dans l'économie. Le Tableau 1 résume ces corrections.

France, 2010	Comptabilité nationale ^a	TES Hybride Imaclim ^b
Part de l'énergie dans l'économie	6,3%	4,3%
Ratio ménages/industries dans l'usage énergétique	0,5	0,8
Facture énergétique des ménages	7,4%	6,6%
Facture énergétique de la production	2,4%	1,7%

^aSource : Institut national de la statistique et des études économiques (INSEE)

^bSource : Calcul de l'auteur à partir des données de l'INSEE, l'AIE, ENERDATA

TABLE 1 – Différences macroéconomiques du système énergétique entre tableaux INSEE et IMACLIM

On observe une baisse significative de l'énergie dans l'économie, et de la part des dépenses énergétiques à la fois pour les ménages et dans le système de production.

La réduction globale de l'énergie s'explique d'abord par le traitement des autoconsommations des secteurs énergétiques lors de la procédure. En effet, la comptabilité nationale enregistre dans ses TES des factures importantes, qui correspondent à un même volume d'énergie. Elles ont pour origine la libéralisation du marché, et en particulier le *trading* de l'électricité qui conduit à des échanges en valeur sans contre partie physique. Nous ne les prenons pas en compte dans le cadre comptable hybride.

Une autre partie de cet écart relève des différences de nomenclature. A l'inverse du cadre comptable IMACLIM, la comptabilité nationale intègre les usages non-énergétiques de l'énergie (matières premières), et décrit ainsi une production plus vaste de la branche énergie. La procédure d'hybridation IMACLIM s'attache, quant à elle, à décrire une production énergétique cohérente à celle soumise à une contrainte carbone.

Il est important de noter que le niveau de correction est très hétérogène lorsque l'on regarde le détail sectoriel (cf. Figure 2).

En raison essentiellement des différences de nomenclature, la correction est importante sur le secteur de la chimie et de la pharmacie, dont une grande part importante des dépenses

³Pétrole brut, Gaz naturel, Charbon à coke, Charbon bitumineux, Coke de charbon, Autres produits du charbon, Essence et bioéthanol, Gaz de pétrole liquéfié, Carburacteur, Gazole et biodiesel, Fioul domestique, Fioul lourd, Autres produits pétroliers, Electricité, Chaleur, géothermie, solaire thermique.

⁴Sidérurgie, autre métallurgie, ciment, autre minéraux non ferreux, construction de bâtiments, chimie et pharmacie, papier et carton, extraction minière, équipement du transport, services de transport, agriculture et foresterie, pêche, industrie agroalimentaire

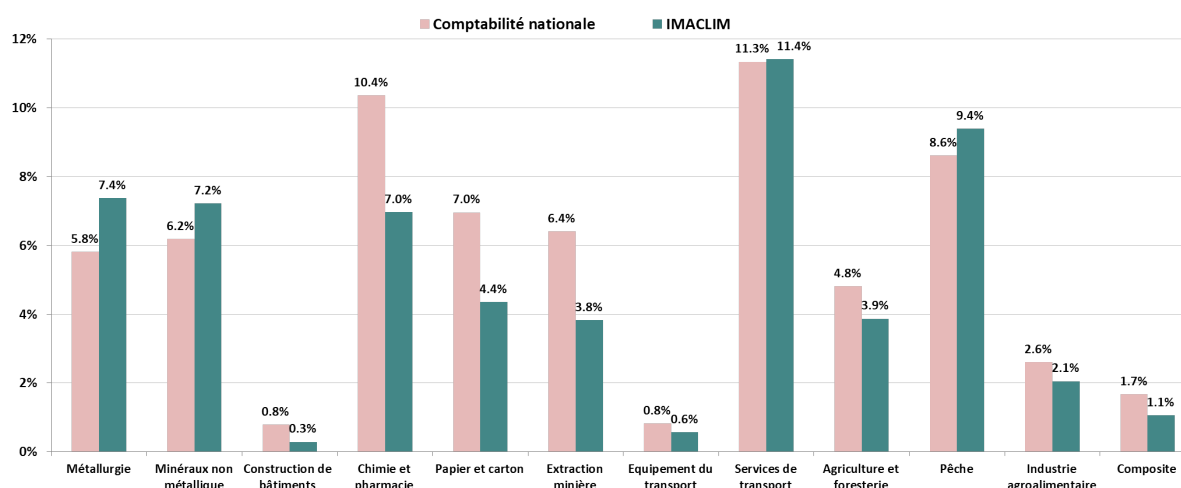


FIGURE 2 – Correction des dépenses énergétiques par secteur

énergétiques est faite pour de la matière première à sa production. En revanche, nous notons que la part des coûts énergétiques des secteurs de la métallurgie et des minéraux non-métalliques a augmenté qui ont été en fait segmenté dans notre travail⁵.

Au-delà des secteurs énergétiques, le travail d'hybridation a été étendu aux flux de l'acier et du ciment. En rassemblant un ensemble de données directement issues des sources statistiques sectorielles, nous isolons ces secteurs de leurs agrégats sectoriels initiaux pour prendre pleinement en compte leur hétérogénéité dans l'analyse. La Figure 3 illustre ces hétérogénéités.

Au sein de la métallurgie (cf. Figure 3a), la transformation de l'acier représente moins de la moitié de la valeur ajoutée. Cependant, elle couvre, à cause de la cokéfaction, la grande majorité des dépenses énergétiques du secteur de la métallurgie, ainsi que la presque totalité des émissions de CO₂. Nous notons également que l'acier représente environ la moitié des échanges extérieurs de la métallurgie.

Au sein du secteur des minéraux non-métalliques (cf. Figure 3b), les hétérogénéités sont encore plus frappantes. Les ventilations des factures énergétiques et des émissions de CO₂ entre le ciment et le reste du secteur des minéraux non-métalliques sont assez équilibrées. Pourtant, les parts de la production, de la valeur ajoutée, et surtout, du commerce extérieur du ciment représentent une faible proportion au sein de l'agrégat des minéraux non-métalliques.

Ce diagnostic montre que l'hybridation est importante pour conduire des analyses de compétitivité à l'échelle d'un secteur. Sans ce gain en granularité sectorielle, nous ne contrôlons pas correctement les secteurs et les segments d'activités qui supportent le poids d'une politique environnementale conduisant à des effets macroéconomiques significatifs. Par ailleurs, nous

⁵Nous ré-agrégeons ces deux secteurs pour reconstituer les agrégats initiaux (métallurgie et minéraux non-métalliques) dans le but de comparer des parts énergétiques cohérentes à la comptabilité nationale.

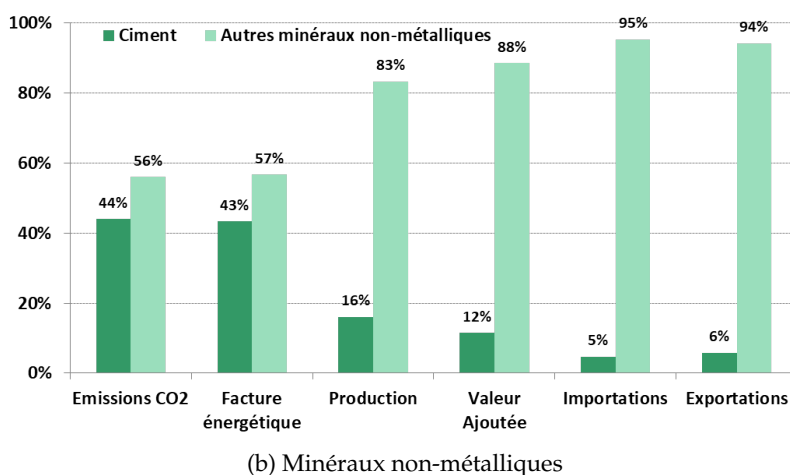
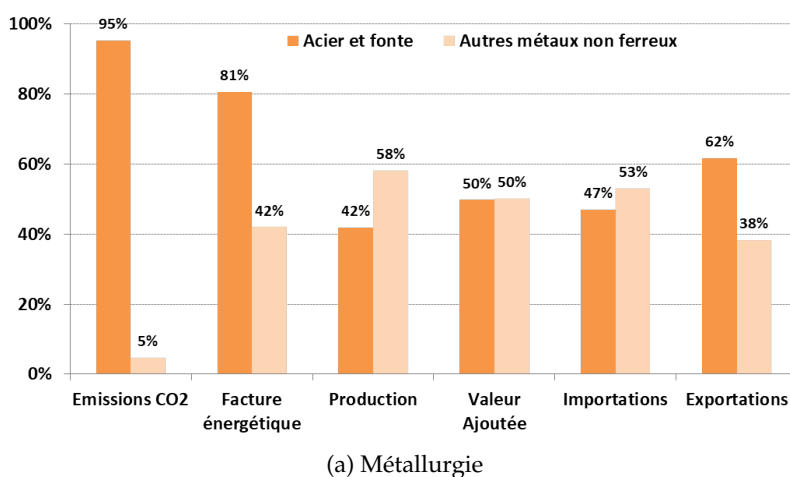


FIGURE 3 – Désagréations sectorielles et hétérogénéités rétablies

verrons plus tard qu'une représentation sectorielle plus fine permet de modéliser différentes sensibilités (formation des salaires, degré d'exposition) suite à une hausse des prix domestique, et d'augmentation la précision de l'analyse.

La procédure d'hybridation pourrait être considérée comme purement technique si en pratique les trois sources majeures d'information (pour les valeurs, les prix et les volumes) étaient plus ou moins cohérentes spontanément, et si les différentes méthodes étaient "standardisées". Cependant, comme le montrent les résultats empiriques précédents, les écarts sont importants. Nous nous attendons à ce que les analyses d'une politique énergétique soient alors contrastées, entre un modèle calibré sur un TES de la comptabilité nationale, ou un TES hybride tel que nous l'avons constitué.

Chapitre 2 - Implications de la procédure d'hybridation sur l'analyse économique d'une politique environnementale

Dans la pratique, les modélisateurs ne s'attardent pas à détailler le processus d'hybridation des données pour développer les TES servant au calibrage de leurs modèles d'équilibre général calculable (EGC), et à notre connaissance aucune analyse de sensibilité des résultats de la modélisation aux données de référence n'existe réellement. Ce chapitre vise à révéler les impacts des traitements de données sur les évaluations des politiques énergétiques en utilisant un modèle EGC agrégé à deux secteurs (l'énergie et le reste) en économie ouverte. Le modèle est majoritairement basé sur des hypothèses néoclassiques. Une littérature croissante remet en question la pertinence de telles approches pour l'analyse de la politique énergétique, en particulier pour les changements techniques non marginaux sur le long terme (Hourcade et al., 2006). Néanmoins, nous conservons un cadre standard pour isoler la question spécifique des traitements de données et des innovations méthodologiques.

Nous calibrons alternativement le modèle EGC sur trois TES agrégés, donnant ainsi trois modèles construits sur la même base et prêts pour la simulation :

- **TES comptabilité nationale** : TES non hybride issu des comptes nationaux
- **TES IMACLIM** : TES hybride issu de la procédure d'hybridation IMACLIM présentée dans le chapitre précédent
- **TES SGM** : TES hybride issu de la procédure d'hybridation du *Second Generation Model* (SGM)⁶

Nous évaluons ensuite les coûts en bien-être des réductions de consommation d'énergie permises par l'introduction d'une taxe sur les consommations énergétiques. L'objectif est d'examiner la dispersion des résultats liée à la variabilité des parts de coûts énergétiques de référence et à la ventilation de leurs consommations dans les différents TES.

Nous considérons trois types de politique en fonction des agents économiques ciblés par les objectifs de réduction de consommation énergétique : (i) la "*politique globale*" cible les ménages et les industries avec une taxe globale ; ii) la "*politique industrie*" ne cible que les entreprises, avec une taxe sur la consommation intermédiaire d'énergie ; iii) la "*politique ménage*" cible uniquement les ménages au moyen d'une taxe sur la demande finale spécifique. Nous utilisons un système de taxe qui s'appuie sur des volumes d'énergie. Cette caractéristique est cruciale dans un contexte de prix différenciés de l'énergie. Pour chaque type de politique, nous explorons un profil complet d'objectifs de réduction d'énergie - de 0% à 99%.

⁶Contrairement à la procédure IMACLIM, celle-ci maintient un prix de l'énergie net-de-taxe identique pour tous les agents. Par soucis de concision, nous ne présentons pas les résultats issus de ce modèle dans ce résumé.

La hiérarchie des coûts en bien-être est identique et cohérente avec celle des systèmes énergétiques des bases de données utilisées pour le calibrage. En effet, le coût en bien-être est d'autant plus faible que la part des coûts énergétiques à l'année de référence est faible (cf. Tableau 1) pour l'ensemble des objectifs de réduction énergétique et pour tout type de politique (cf. Figure 4 pour la *politique globale*).

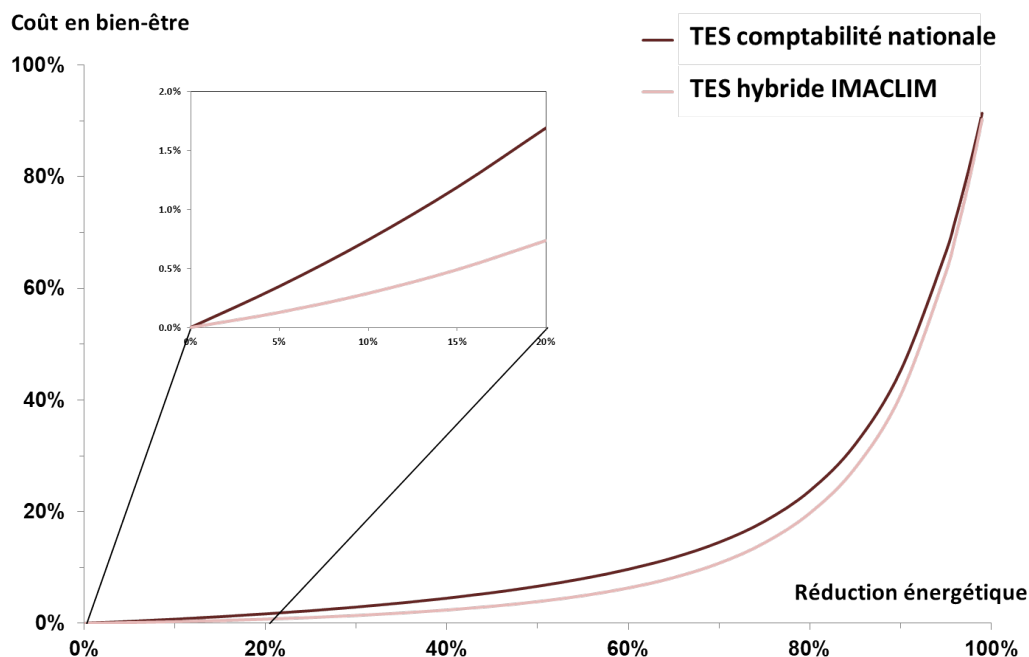


FIGURE 4 – Coût en bien-être des réductions d'énergie induites par une politique globale sur les prix

Le modèle calibré sur le TES de la comptabilité nationale, avec prix unique de l'énergie, et le modèle calibré sur le TES hybride IMACLIM, avec des prix différenciés entre agents, donnent à première vue des résultats proches de coûts en bien-être. Néanmoins, en retenant des objectifs de réduction d'énergie allant de 0% à 20%, ce qui correspond à des politiques réalistes, les divergences apparaissent qu'une représentation en termes relatifs permet de mettre en évidence par un "zoom" (cf. Figure 5 pour tout type de politique).

Selon le type de politique mis en place, les écarts entre le modèle calibré sur des données hybrides et le modèle calibré sur la comptabilité nationale ne sont pas du même ordre. Une taxe supportée uniquement par les ménages donne des divergences entre les modèles moins fortes qu'une taxe supportée par les entreprises. Nous expliquons ce résultat par la propagation de la hausse du prix de production : cibler uniquement les entreprises implique des effets multiplicateurs qui se propagent dans toute l'économie, alors que cibler uniquement les ménages impacte la consommation finale, et donc à la fin du processus de production.

Par ces jeux de simulations, nous confirmons l'importance du traitement des données, et la

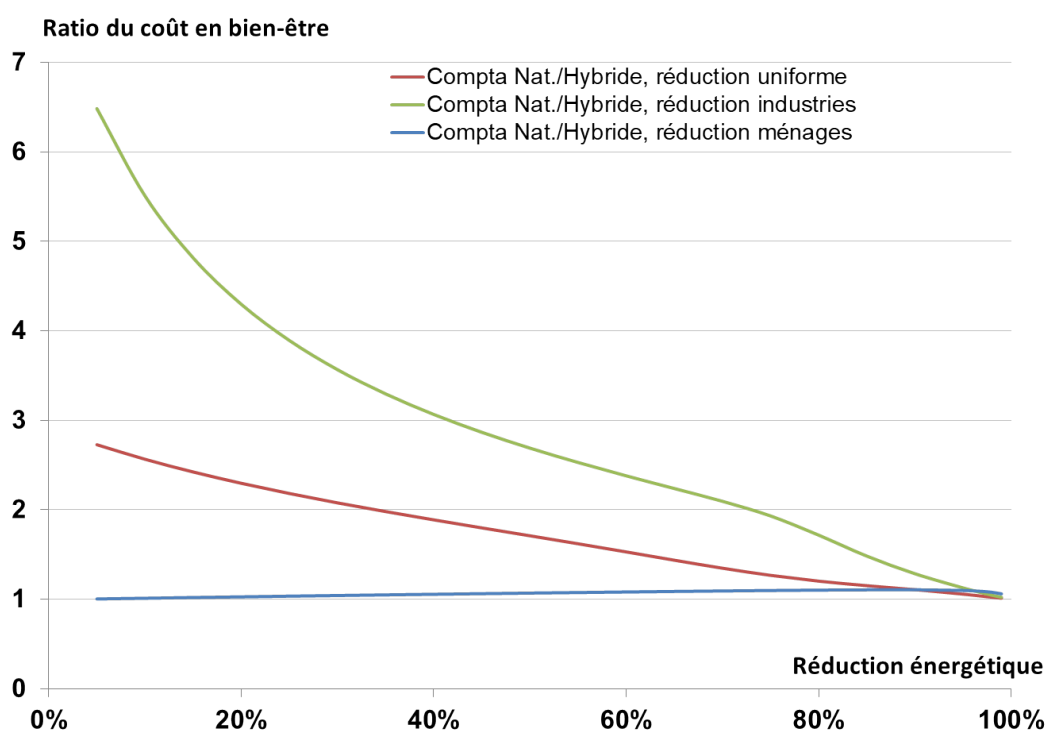


FIGURE 5 – Ratio des coûts en bien-être pour différents calibrage du modèle et différentes politiques de réduction

nécessité de rendre explicite la procédure d'hybridation pour l'analyse d'une politique climatique. Le chapitre montre que les écarts non-marginaux entre les descriptions empiriques de l'économie, résultant de la construction de TES hybrides, ont un impact significatif sur l'analyse des politiques énergétiques, et ce même à un niveau élevé d'agrégation au sein du modèle néoclassique "standard". En effet, les procédures d'hybridation utilisées pour rapprocher les données énergétiques sur les prix et les quantités ont un impact direct sur la description des caractéristiques empiriques qui ne peuvent qu'influencer ce type d'analyse : la taille économique des flux énergétiques, la part relative des factures d'énergie payées par les secteurs productifs et les consommateurs finaux, les prix relatifs de l'énergie selon les agents économiques. Evidemment, les écarts observés sur les implications des politiques varient avec les hypothèses de modélisation, notamment sur le changement technique, le bouclage macroéconomique, et le niveau d'agrégation des secteurs productifs. Les différences entre les analyses de politiques s'appuyant sur des modèles EGC hybrides et néoclassiques "standards" sont ensuite amplifiées par l'utilisation d'expertises techniques à la place de fonctions de production agrégées calibrées par des estimations économétriques. Même si les impacts des choix de modélisation et d'agrégation ont déjà commencé à être discutés dans la littérature, ils n'avaient pas été isolés jusqu'ici de l'impact des techniques d'hybridation sur la description empirique initiale.

La première motivation pour l'élaboration de matrices hybrides reste bien entendu d'inté-

grer dans le cadre d'un modèle EGC une expertise sur les changements techniques futurs et les possibilités d'économies d'énergie à différents horizons temporels. Par conséquent, cette thèse se poursuit naturellement en s'appuyant sur ce type de modèle hybride, que nous présentons au chapitre suivant.

Chapitre 3 - La plateforme de modélisation IMACLIM -pays

Différentes versions d' IMACLIM-S ont été développées de façon indépendante, conduisant à autant d'outils que de pays (France, Brésil, Afrique du Sud), avec différents supports (EXCEL, SCILAB). Même si une ancienne version peut toujours être utilisée comme point de départ pour le développement d'une nouvelle version d' IMACLIM-S , le traitement des données (procédure d'hybridation) et la restauration du système à résoudre demandent beaucoup de temps pour être adaptés à une étude différente.

C'est pourquoi cette thèse essaie d'établir un cadre de modélisation flexible permettant de calibrer "ad nutum" le modèle soit sur une description sectorielle étendue, soit sur une représentation compacte, pour in fine soutenir et faciliter les développements pour de nouveaux pays (Arabie Saoudite, Chine, Inde). Pour ces raisons, une nouvelle plateforme rationalisée a été développée en utilisant SCILAB, un logiciel open source pour le calcul numérique.

Architecture principale

IMACLIM est un modèle générique qui peut être décliné dans différentes versions. Notre premier objectif est de construire une plateforme grâce à une architecture commune qui supporte toutes ses versions. La Figure 6 illustre cette architecture. Les versions d' IMACLIM reposent sur des opérations communes (hybridation, calibration, résolution, etc.) identiques et modulaires pour s'adapter à des demandes propres de l'utilisateur (niveau d'agrégation, variables de résolution). Au final, chaque version se distingue par le détail des tableaux économiques et physiques qui sont mis en équation pour la simulation.

La plateforme commune a été développée dans cette thèse autour d'une version française d' IMACLIM-S calibré à l'année 2010. Grâce à la flexibilité de l'architecture, la version peut être décomposée en plusieurs "sous-versions" selon le niveau sectoriel choisi par l'utilisateur pour la modélisation via le "module d'agrégation". Le TES hybride initialement construit donne évidemment la limite d'extension sectorielle (29 secteurs pour IMACLIM-S FRANCE). La procédure d'hybridation a également été automatisée. La désagrégation des ménages est aussi un choix de l'utilisateur, tant que la clé de répartition est disponible comme données d'entrée. Pour la version française, la désagrégation des ménages peut aller jusqu'à dix classes de revenus. Une dernière flexibilité notable est de pouvoir changer le système de résolution autour de différents modèles économiques qui traduisent des "visions" et des comportements

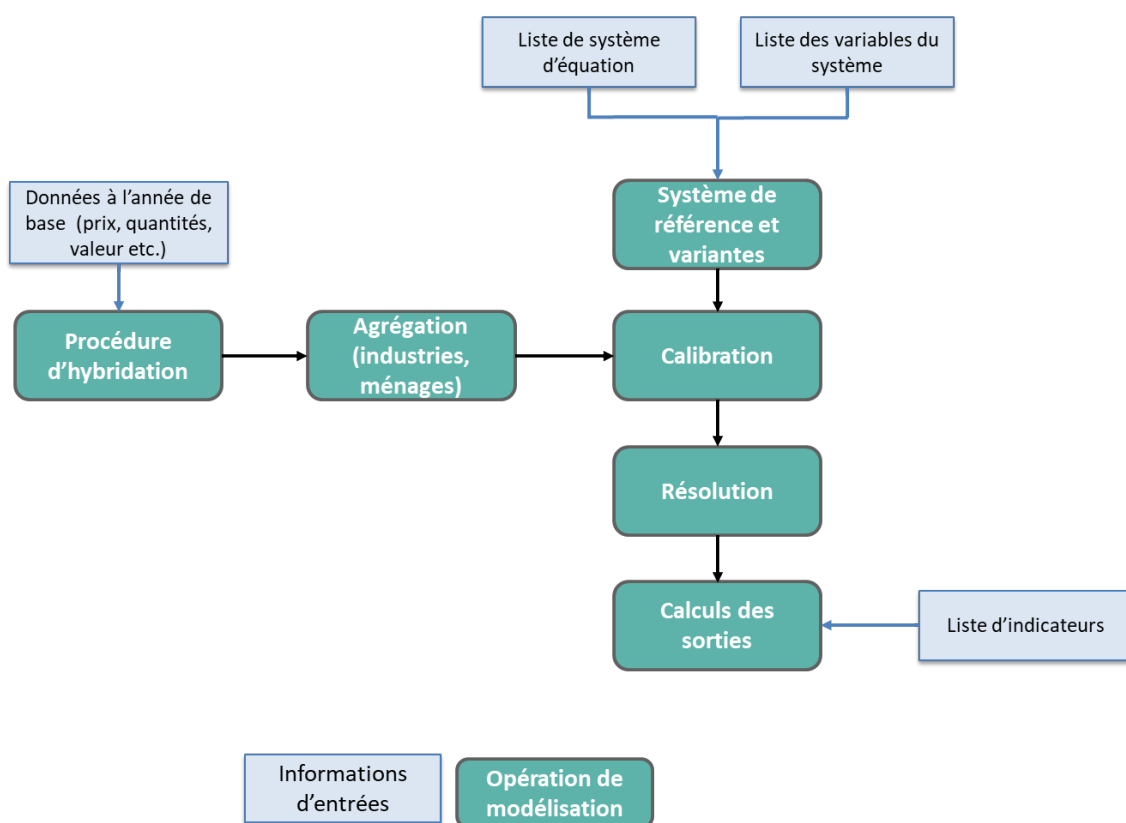


FIGURE 6 – Architecture de la plateforme IMACLIM -pays

différents pour l'économie. Les équations comptables font, quant à elles, parties du "noyau" de l'architecture commune à toutes les versions et ne peuvent être substituées, elles sont toujours vérifiées.

Principales caractéristiques de modélisation

Le modèle IMACLIM-S utilisé dans cette thèse représente une économie française ouverte sur l'extérieur, désagrégée en quatre catégories d'agents (les ménages, les sociétés, les administrations publiques et le "reste-du-monde"). Un état économique est décrit par des transactions qui sont réalisées, au cours d'une année, sur le territoire national. L'ensemble des transactions entre agents est schématisé par la Figure 7.

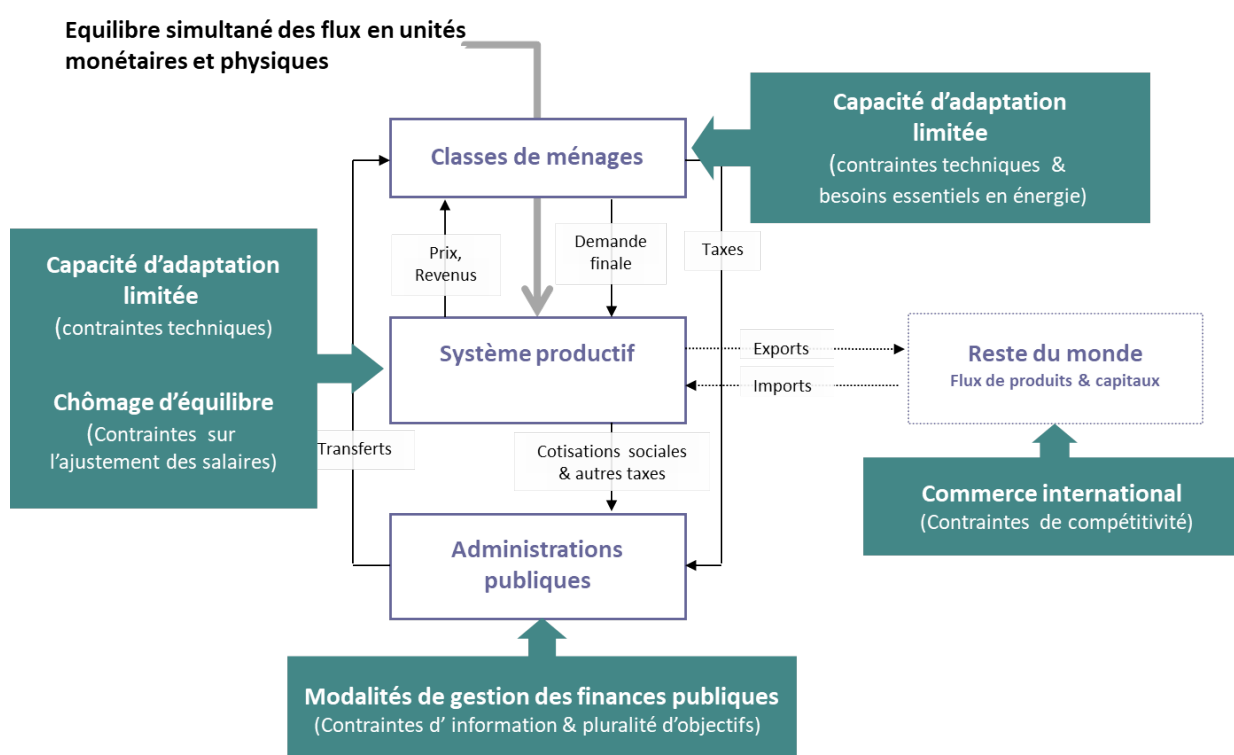


FIGURE 7 – Représentation schématique du modèle IMACLIM-S

Le modèle repose sur un ensemble de paramètres économiques sur lesquels "diverses croyances" s'expriment, et à partir desquels il faut conduire des tests de sensibilité systématiques : (i) l'ajustement des niveaux de consommation d'énergie en réponse aux signaux-prix, (ii) la réponse des salaires à l'évolution du chômage, (iii) l'efficacité de modalités alternatives de gestion des finances publiques, (iv) l'effet de la compétitivité-prix en observant la réponse à l'évolution des coûts de production des échanges extérieurs de la France avec le reste-du-monde, exogène au modèle. Ce dernier point est fondamental pour parvenir à une analyse conjointe des effets de la politique climatique française sur les émissions de CO₂ et les échanges extérieurs à un niveau sectoriel suffisant.

Formation du prix domestiques	
Prix de production	$P_Y = P_{IC} \times \alpha + p_L \cdot l + P_K \cdot k + \bar{\tau}_Y \cdot P_Y + \bar{\Pi} \cdot P_Y$
Prix moyen	$P = [P_Y \cdot Y + P_M \cdot M] / [Y + M]$
Formation des revenus et usages	
Investissement	$R_{inv} = \sum P_I \cdot I$
Trade-offs	
Consommation finale	$C = f_C(R_{CONS}, P)$
Consommation intermédiaire	$\alpha = f_\alpha(P, \omega, P_K, \phi_L)$
Travail	$l = f_l(P, \omega, P_K, \phi_L)$
Capital	$k = f_k(P, \omega, P_K, \phi_L)$
Décomposition de la valeur-ajoutée	
Courbe salaire-chômage	$\omega = f_\omega(1 - \frac{L}{NS})$
Coût du capital	$P_k = (\sum p_I \cdot I) I$
Mark-up pricing	$\Pi = \bar{\Pi}$
Commerce international	
Exports	$X = f_X(P_Y, P_M, X)$
Imports	$M = f_M(P_Y, P_M, Y)$
Équilibre comptable en volume	
Marché des biens	$Y = Y \cdot \alpha + C + G + I + X - M$
Marché du travail	$L = \sum l \cdot Y$
Balance des capitaux implicite	$I = \bar{\beta} \sum k \cdot Y$
Moteur de croissance pour projection	
Population active	$NS = (1 + \omega_{NS})^t \cdot N_0$
Progrès sur le travail	$\phi_{L_i} \neq 0$

TABLE 2 – Représentation compacte des équations dans IMACLIM-S FRANCE

Les deux prochains chapitres utilisent le modèle IMACLIM-S FRANCE à des fins méthodologiques pour conduire des tests de sensibilités autour de paramètres incertains ou instables. Nous montrons comment le modèle permet d'abord une meilleure compréhension des mécanismes économiques grâce à un gain en granularité sectorielle, et donne ensuite l'occasion de clarifier les dialogues autour de ces paramètres controversés.

Chapitre 4 - L'influence de paramètres clés et de la représentation sectorielle

Les modèles EGC manquent souvent de détails sur les secteurs intensifs en énergie et exposés au commerce international, secteurs pourtant clés pour la mise en œuvre de politiques climatiques domestiques. Récemment, des efforts ont été faits pour désagréger ces secteurs, et ces tentatives ont montré que leur prise en compte modifient significativement l'évaluation des effets distributifs de la politiques climatique (Alexeeva-Talebi et al., 2012; Caron, 2012).

Pour intégrer une "granularité" sectorielle pertinente à la conception de politiques environnementales, articulant à la fois compétitivité et environnement, nous profitons de la procédure d'hybridation exposée au chapitre I. En isolant certains secteurs – ceux de l'acier et du ciment - de leurs agrégats initiaux -respectivement le secteur de la métallurgie et le secteur des minéraux non-métalliques- tout en intégrant des données physiques, nous allons au-delà des techniques de désagrégation précédentes basées uniquement sur des données économiques (Böhringer et al., 2012).

En utilisant IMACLIM-S FRANCE ce chapitre rappelle les principaux mécanismes macroéconomiques suite à la mise en place d'une taxe carbone, puis démêle les interactions entre les paramètres clés de la modélisation ainsi que l'influence de la représentation sectorielle.

En introduisant un prix unilatéral du carbone, les effets de propagation d'une hausse des coûts de l'énergie dans le système productif peuvent aboutir à un coût global encore plus important de la mesure. Pour atténuer la hausse des coûts énergétiques retombant sur le coût de production, la littérature s'accorde à dire qu'elle doit s'accompagner d'une baisse des charges sur le coût du travail, dans le cas des économies européennes tout du moins. La taxe conduit alors un double dividende possible selon deux paramètres controversés :

- la sensibilité au chômage des salaires, soit la possibilité de transformer une baisse des charges sociales en hausse des salaires,
- et la sensibilité des prix aux échanges extérieurs.

Il existe beaucoup d'incertitude sur les valeurs à donner à ces deux paramètres. Concernant la sensibilité des salaires au chômage, la valeur de Blanchflower and Oswald (2005) est re-

tenue de façon presque automatique sans que l'on puisse en analyser les déterminants (par exemple l'impact de l'organisation de la négociation salariale). Pour la sensibilité des échanges extérieurs, nous sommes confrontés à ce que [Fontagné et al. \(2017\)](#) appellent le "puzzle des élasticités" du commerce international (cf. Chapitre 5).

Pour comprendre la nature des gains de granularité sectorielle, nous conduisons d'abord notre analyse sur un modèle compact à trois secteurs (énergie primaire, énergie finale et un composite). Plus particulièrement, nous étudions les incidences d'une taxe carbone unilatérale recyclée en baisse du coût du travail avec différents types de modélisation de la courbe salaire-chômage : les salaires suivent les prix internationaux ou les salaires suivent les prix à la consommation. Nous analysons alors la sensibilité des résultats aux élasticités du commerce extérieur (cf Figure 8).

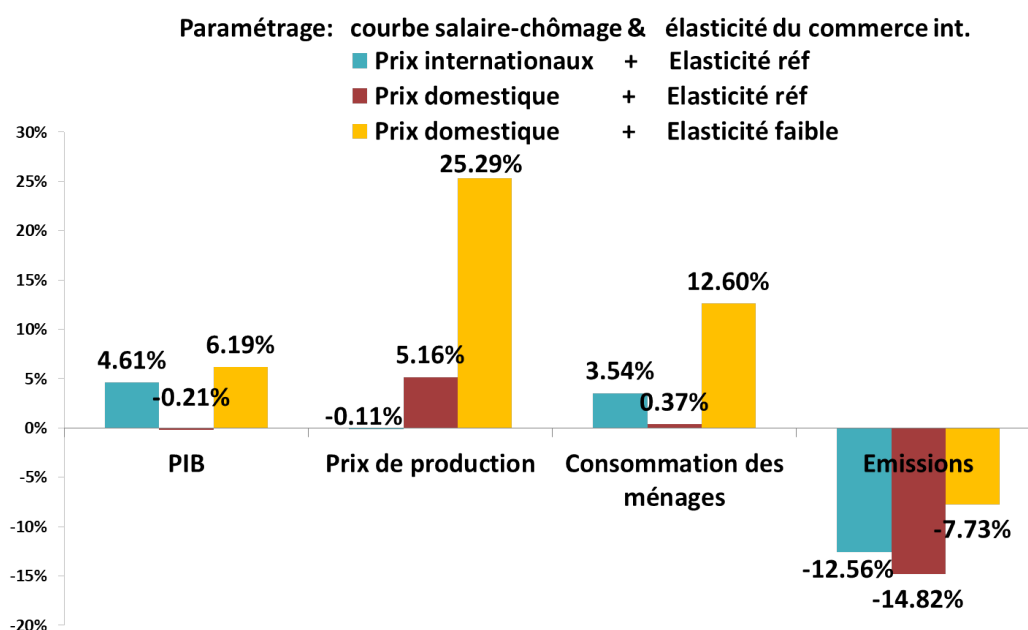


FIGURE 8 – Lien entre indexation des salaires et exposition de l'économie dans un modèle compact

Lorsque les salaires suivent les prix internationaux, la baisse des cotisations sociales permet une baisse du prix de production. Cela favorise la consommation des ménages, et l'activité économique : nous obtenons un double dividende avec une croissance du *PIB*.

En revanche, lorsque le pouvoir de négociation salariale est tel que les salaires sont indexés sur les prix à la consommation, l'économie est déprimée. La baisse des charges sociales ne permet plus une baisse du prix de production, qui augmente. Cette hausse entraîne une baisse des échanges extérieurs mais aussi une baisse du pouvoir d'achat des ménages : l'économie entre dans un cercle récessif. Ce résultat, qui est analytiquement intéressant, n'est pas tenable. En effet, il semble difficile d'obtenir une économie exposée à la concurrence internationale avec

des salaires indexés sur les prix domestiques.

Nous réduisons alors l'ouverture de l'économie en donnant des valeurs plus faibles aux élasticités des échanges extérieurs, tout en gardant cette même indexation des salaires sur les prix à la consommation. Cette indexation provoque une forte augmentation du prix de production. Néanmoins, l'augmentation des salaires dynamise la consommation intérieure avec une faible pénalité sur les marchés internationaux : nous obtenons un double dividende avec une croissance du *PIB*. Cependant, cette image positive est en partie trompeuse car, pour satisfaire la demande intérieure, il faut augmenter de 40% le déficit public grâce un reste du monde "prêteur".

L'enjeu qui résulte de ces simulations est le lien à établir entre degré d'exposition au commerce international et les emplois nomades et sédentaires tel que définis depuis quelques années par Pierre Noel Giraud (cf. Chapitre 5). Cette interaction nécessite une représentation sectorielle plus fine qu'un modèle compact, et l'hybridation nous permet de faire des progrès en ce sens.

Pour bien comprendre l'influence de la différenciation sectorielle, nous observons son impact seul sur l'analyse pour une même réforme fiscale. Pour cela, nous ouvrons la boîte de notre modèle compact à 3 secteurs pour passer à une modélisation à 13 secteurs (cf. Figure 9). Nous gardons un paramétrage homogène pour la courbe salaire-chômage et la sensibilité des échanges extérieurs.

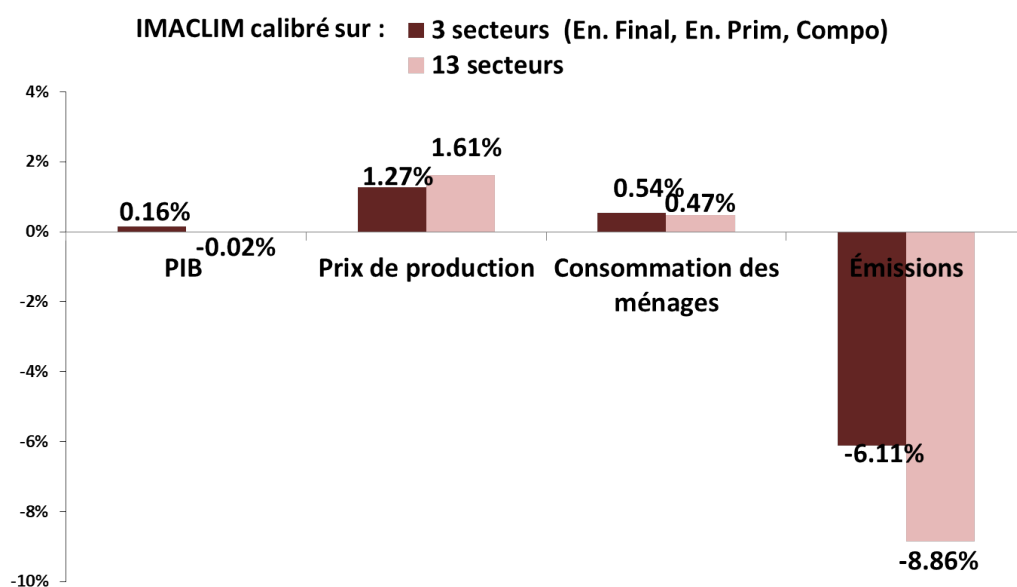


FIGURE 9 – Incidence d'un gain en granularité sectorielle au calibrage

Nous notons que l'écart de l'impact macroéconomique d'une même taxe est de faible amplitude entre les deux modèles. Pourtant, les effets intersectoriels suffisent à renverser le signe de l'incidence sur *PIB*. Il est aussi important que noter que l'intensité moyenne en CO_2

du système agrégé de production conduit à une baisse des émissions moins importante que celle observée dans le modèle désagrégé.

Dans l'analyse des résultats du modèle désagrégé, nous montrons que la prise en compte de certains secteurs dans la modélisation représente un enjeu réel (ciment et acier) avec des pertes importantes pour certains segments de la chaîne de production, masquées en travaillant à un niveau agrégé.

Certes, les effets de la désagrégation sectorielle pure (via le jeu des nomenclatures) semblent de deuxième ordre à l'échelle macroéconomique. Pourtant, nous avons retenu à ce stade des paramètres identiques pour tous les secteurs (élasticité du commerce extérieur, courbe salaire-chômage). Il est donc déjà important de noter que l'adoption d'échelles différentes dans la granularité sectorielle de l'activité économique conduit à des différences non négligeables dans les résultats. Un pas de plus est nécessaire pour étudier comment ces différences sont amplifiées lorsque l'on profite de la désagrégation pour intégrer des paramètres hétérogènes, spécifiques à chaque secteur, tout en introduisant plus de réalisme dans une analyse, conduite jusqu'ici, en balayant un large spectre de paramètres. C'est que nous faisons dans le Chapitre 5 en montrant comment l'hybridation permet, sinon de réduire, de mieux contrôler les incertitudes paramétriques.

Chapitre 5 - L'articulation entre la formation des salaires et le degré d'exposition au commerce extérieur

La littérature a récemment insisté sur le lien entre la fragmentation géographique de la chaîne de valeur mondiale, et la dynamique de la formation des salaires dans les pays industrialisés. Le postulat de base est que pour certains segments de la production, les travailleurs peu qualifiés des pays en développement ont un avantage compétitif par rapport aux travailleurs peu qualifiés des pays développés. Cet avantage introduit une concurrence sur les salaires qui tend à réduire le pouvoir de négociation des travailleurs dans les pays industrialisés. Il y a alors une tendance à la hausse pour une demande d'emplois qualifiés avec des salaires plus élevés, ce qui est une source d'inégalités croissantes dans les économies développées (Timmer et al., 2014).

Frocrain and Giraud (2016) vont plus loin en soulignant l'existence de deux catégories d'emplois. Une première catégorie correspond à des *emplois sédentaires* qui ne peuvent être réaffectés ailleurs car ils seront toujours nécessaires localement (par exemple le coiffeur). Une deuxième catégorie correspond à des *emplois nomades* qui sont exposés aux marchés internationaux car ils peuvent être sous-traités à l'étranger⁷. Les travailleurs des *emplois sédentaires* ont un levier

⁷En conséquence, l'augmentation de la demande finale nationale pourrait ne pas entraîner une augmentation de l'emploi dans le pays.

de négociation salariale important tandis que les salaires des travailleurs des *emplois nomades* dépendent de la concurrence salariale internationale. Dans cette thèse, nous ne distinguons pas le degré d'exposition des activités du degré d'exposition des emplois. Nous supposons une définition univoque entre ces deux terminologies.

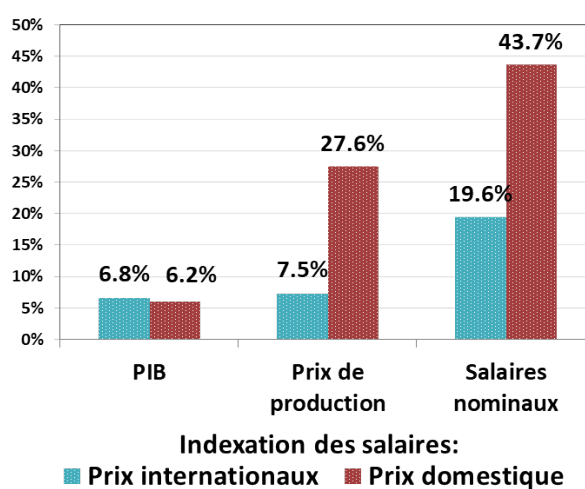
Ce chapitre vise à montrer que des progrès peuvent être réalisés pour l'analyse des politiques climatiques grâce au gain de granularité sectorielle dans la modélisation permis par l'effort d'hybridation. En effet, si la différenciation des comportements sectoriels est parfois négligée, nous supposons qu'elle est cruciale pour comprendre la dynamique des changements structurels industriels.

Nous montrons ici la possibilité de mieux contrôler, sous une contrainte de politique climatique, l'articulation entre deux paramètres incertains : les élasticités des échanges extérieurs et la courbe salaire-chômage en différenciant les secteurs selon leurs activités, qu'elles soient orientées vers l'intérieur ou l'extérieur de l'économie.

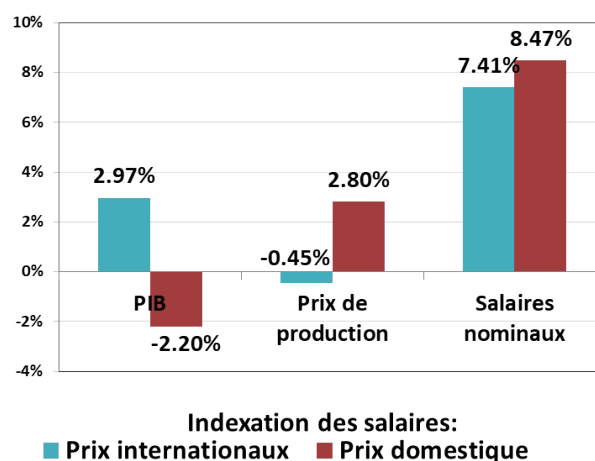
Dans un premier temps, nous nous confrontons à la controverse autour de l'évaluation des élasticités des échanges extérieurs (Fontagné et al., 2017) dont les analyses manquent au niveau sectoriel. Les seules études trouvées sont celles de Erkel-Rousse and Mirza (2002) et Fouquin et al. (2001). Faute d'études plus récentes, nous les avons utilisées et adaptées à notre échelle sectorielle pour analyser les incidences de cette information hétérogène sur l'évaluation de la politique du carbone (Figure 10a).

Il apparaît qu'avec ces élasticités, même en cas d'indexation des salaires sur les prix domestiques, nous obtenons un double dividende avec une hausse de *PIB*. Ce résultat, à priori contradictoire avec les résultats théoriques vus dans le chapitre précédent, permet de souligner les dangers à importer, sans précautions, dans une structure de modélisation précise, des informations calculées avec un référentiel significativement différent. Les élasticités-volumes que nous avons trouvées sont inférieures à 1 et conduisent à un paradoxe : une politique généreuse en hausse des salaires décrit un pays qui tire plus de revenus de ses exports tout en n'en produisant moins.

Nous mettons en évidence une erreur de méthode qui vient du fait que les élasticités utilisées reposent sur des indices chaînés de volume, calculés sur des séries en valeur, et qui ne sont pas comparables aux volumes physiques que nous décrivons dans *IMACLIM*. Néanmoins ces informations nous renseignent sur la sensibilité relative des secteurs aux échanges extérieurs. Nous les avons alors retenues comme des élasticités en "valeur", puis nous avons proposé une méthode pour dériver ensuite en des élasticités en "volume" physique compatible avec nos exercices de modélisation. Pour différents types de modélisation de réactions des salaires, nous retrouvons le mécanisme de base observé dans le Chapitre 4, conforme à la théorie : un double dividende pour des salaires qui suivent les prix internationaux et une perte de *PIB* pour une négociation salariale alignée sur les prix domestiques (Figure 10b).



(a) Elasticités en "valeur"



(b) Elasticités en "volume"

FIGURE 10 – Intégration d'élasticités différenciées et compatibles avec IMACLIM

Jusqu'à présent, nous avons supposé un paramétrage homogène de la formation des salaires pour tous les secteurs, avec deux cas extrêmes de réactions (suivant soit les prix internationaux soit les prix domestiques), et surtout, nous n'avons fait aucun lien entre régime de formation salariale et élasticités des échanges extérieurs. Pour tenir en compte du lien entre la capacité de négociation et d'évolution des salaires en fonction du type d'activités, et de leur degré d'exposition ou d'insertion dans l'économie mondiale, nous avons introduit une courbe salaire-chômage hétérogène où nous définissons trois niveaux de réajustement des salaires. Les salaires des secteurs exposés au commerce international sont indexés sur les prix internationaux, tandis que les secteurs protégés ont des salaires qui se négocient davantage sur l'évolution des prix domestiques. Nous définissons également un cas intermédiaire. L'intro-

duction de cette méthode a pour but d'expliciter où l'on se situe dans un intervalle de visions contrastées de formation des salaires. Dans ce cas présent, la taxe implique des pertes de PIB mais qui s'accompagnent d'un gain en emplois de 1.6% (cf Figure 11).

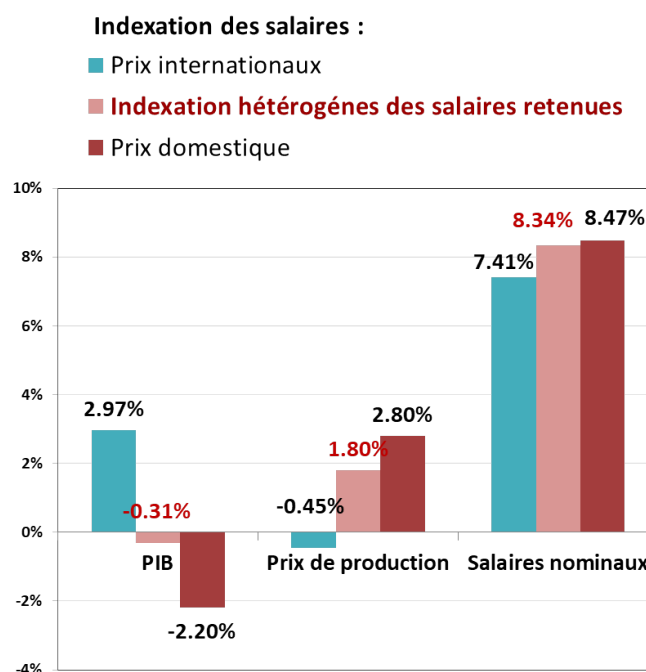


FIGURE 11 – Indexation sectorielle non uniforme de la courbe salaire-chômage

A ce stade, l'objectif n'est pas d'établir une prédiction quant aux conséquences de la taxe carbone en France. L'idée est plutôt de montrer comment l'introduction de la différenciation sectorielle permettra de mieux maîtriser les conséquences sur les secteurs exposés pour, in fine, mieux les accompagner dans une transition vers une économie bas carbone. L'outil développé permettra également de voir quelles stratégies pourront être envisagées pour relancer l'activité sédentaire. Enfin, les apports méthodologiques devraient permettre à l'avenir de mieux discuter la réalité des pratiques salariales face à l'évolution des prix, et cela secteur par secteur.

Evidemment, un tel outil a pour objectif de trouver des synergies possibles, suite à la mise en place d'un signal-prix du carbone, sans peser sur la compétitivité du pays. La compétitivité est l'un des premiers arguments avancés pour éviter la mise en œuvre de toute action ambitieuse contre le changement climatique, bien que les différents sens que l'on peut attribuer à ce terme soient souvent ignorés par ceux qui l'utilisent (Krugman, 1994). La compétitivité n'a pas le même sens à l'échelle nationale qu'à l'échelle sectorielle. Quoi qu'il en soit, les impacts sur la compétitivité nationale dépendent évidemment de la structure de l'économie : la part des secteurs exposés qui supportent la taxe, et la part des secteurs protégés qui en bénéficient. Ainsi, dans ce chapitre, nous introduisons cette hétérogénéité dans le cadre de la modélisation, grâce notamment à la procédure d'hybridation qui isole des secteurs à forte consommation

d'énergie - secteurs du ciment et de l'acier. Une étape suivante consistera à différencier les segments amont de production de ces secteurs (fonte et clinker), puisque ces segments sont à forte intensité énergétique mais ne représentant qu'une faible part de la valeur ajoutée, et ne pouvant être externalisés en raison des coûts de transport et de capacité d'investissement.

Ce chapitre restreint l'analyse de la politique climatique à celle d'une taxe unilatérale sur le carbone. Pour aller plus loin, il serait intéressant de pouvoir mettre en œuvre d'autres réformes. Si la politique climatique est conçue pour avoir un effet positif sur l'environnement, l'impact de la mesure sur les secteurs intensifs en énergie et exposés au commerce international peut annuler cet effet positif. En effet, la délocalisation des secteurs, dans un contexte de mondialisation des échanges, entraîne une augmentation des émissions incorporées dans les importations. En raison des fuites de carbone et selon les spécificités des pays, l'efficacité globale de la mesure peut s'avérer négatif pour l'environnement. Il est alors nécessaire de bien comprendre les interactions entre questions de compétitivité et préoccupations environnementales pour lever les obstacles à la mise en œuvre de la politique climatique. Evidemment cela implique de pouvoir décrire avec précision les incidences environnementales de notre économie, y compris celles de ses échanges extérieurs. C'est une telle illustration qu'aborde le Chapitre 6 soulignant l'intérêt de l'hybridation une dernière fois.

Chapitre 6 - Les différents inventaires d'émissions de la France

Les progrès réalisés par un pays en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) dépendent du périmètre des inventaires des émissions. La convention-cadre des Nations Unies sur le changement climatique (CCNUCC) mesure les objectifs sur la base d'inventaires territoriaux, et n'évalue pas les émissions incorporées dans le commerce international alors que celles-ci représentent un levier pour contrôler les fuites de carbone et comprendre les problèmes de compétitivité.

La prise en compte de ces émissions reste impopulaire auprès des parties prenantes car il existe des incertitudes quant à leur utilisation dans les politiques, et, elles minimisent souvent les efforts déployés pour réduire les émissions dans les pays industrialisés. Au-delà des considérations politiques, leurs estimations ne sont pas évidentes, et il existe dans la littérature plusieurs méthodes permettant d'aboutir à différents types d'inventaires (Sato, 2013). Comme elles exigent beaucoup de données, les modèles s'appuient principalement sur quelques bases de données mondiales existantes dont les flux commerciaux bilatéraux sont équilibrés. Pourtant, le contrôle de ces bases de données et l'articulation avec les modèles prospectifs à l'échelle nationale restent difficiles.

En s'appuyant sur l'analyse Input-Output (AIO) pour un pays, l'objectif de ce chapitre est de définir une méthode de calcul de différents types d'inventaires d'émissions de CO₂ -en passant

notamment d'une logique d'attribution par "lieu de production" à une logique d'attribution par "lieu de consommation"- tout en tenant compte des spécificités des systèmes de production des principaux partenaires commerciaux du pays. Enfin, la technique repose sur des données issues de la procédure d'hybridation présentée au 1 pour ensuite être articulée avec le modèle d'équilibre général IMACLIM-S .

Nous appliquons cette méthode à la France (2010), dont la loi sur la transition énergétique inclue des objectifs de réduction des émissions territoriales sans augmenter les émissions liées à ses importations. Nous décrivons les quinze principaux partenaires commerciaux français couvrant 75% de ses importations. De plus, nous supposons que la France est un petit pays face au reste monde, et nous négligeons les flux des exportations de la France qui pourraient être réimportés dans le pays après transformation dans un pays tiers.

Les résultats permettent de mettre en avant des écarts non substantiels entre les différents type d'inventaires de CO₂ français, prenant en compte ou non les émissions incorporées dans le commerce international (cf. Figure 12).

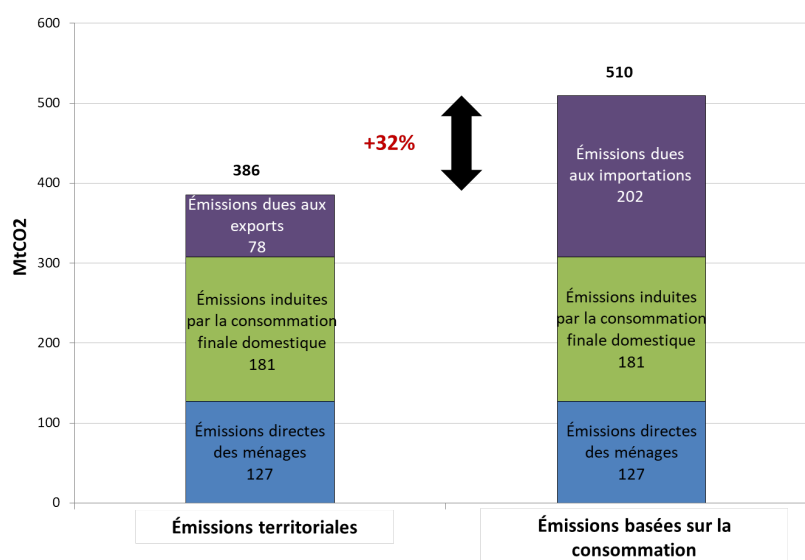


FIGURE 12 – Émissions territoriales vs. émissions basées sur la consommation

Notre estimation des émissions de CO₂ liées à la production territoriale (386MtCO₂) est satisfaisante avec une valeur proche de celle proposée par les comptes européens NAMEA⁸ (384.5MtCO₂). Il apparaît clairement que le passage d'un inventaire d'émissions basé sur la production territoriale à un inventaire basé sur la consommation augmente la contribution française aux émissions mondiales. En effet, les émissions basées sur la consommation du pays s'élève à 510MtCO₂, ce qui correspondant à une augmentation de +32% du bilan des émissions de la France. Ce résultat confirme qu'il est important de se concentrer non seulement sur les émissions directes mais aussi sur le suivi des émissions incorporées dans les biens importés.

⁸National Accounting Matrix with Environmental Account

Par ailleurs, nous estimons que si les produits importés avaient été produits localement, en France, ils auraient générés $135MtCO_2$. En comparant ces émissions aux $202MtCO_2$ "cachées" dans les importations françaises, la mondialisation des échanges induit $67MtCO_2$ d'émissions additionnelles.

Le chapitre fournit des informations originales sur les moteurs des émissions en France. En particulier, nous notons que pour de nombreux secteurs, les émissions de CO_2 attribuées aux exportations compensent les émissions incorporées dans les importations. Cela reflète la part du commerce intra-branche des échanges⁹. Cependant, pour certains secteurs, il existe un écart important entre les émissions allouées aux exportations et les émissions incorporées dans les importations qui font de la France un importateur net de CO_2 (cf. Figure 13).

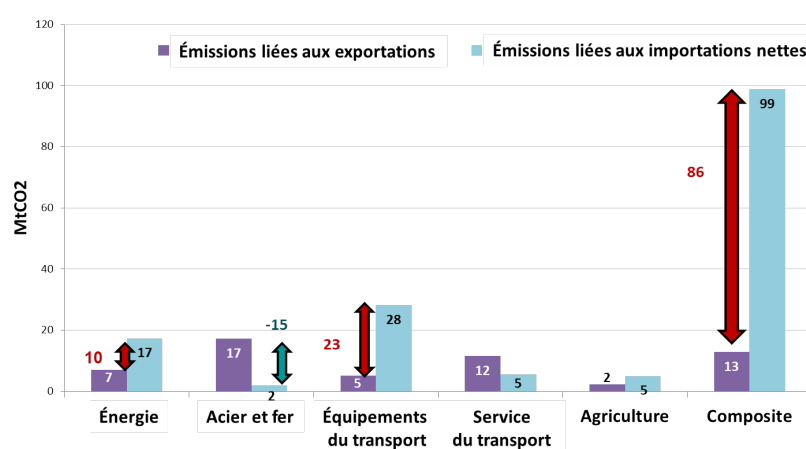


FIGURE 13 – Émissions sectorielles des échanges extérieurs

Le secteur composite est en grande partie responsable du solde positif des importations nettes de CO_2 de la France ($86MtCO_2$). Ce secteur regroupe les industries et les services de l'économie française que nous n'avons pas décrites lors de la procédure d'hybridation (Chapitre D). Il comprend tous les services, mais aussi certaines industries telles que l'industrie textile et électronique dont la France est un importateur net et dont la production à l'étranger est intensive en CO_2 . L'écart des émissions du secteur des équipements de transport est également frappant ($23MtCO_2$). Il s'explique par le fait que les segments de la chaîne de production qui sont intensifs en émissions ont lieu à l'étranger alors que la France exporte des produits quasi-finis, peu intensifs en émissions mais à haute valeur monétaire.

Finalement, ce chapitre donne un aperçu des différents schémas qui permettent d'allouer des émissions à la France. La méthode proposée ne nécessite pas une harmonisation des flux du commerce international du monde entier. Toutefois, elle requiert un effort important sur le

⁹Le commerce intra-branche désigne l'importation et l'exportation de produits similaires entre les pays. Selon l'OCDE, ce commerce est de plus en plus prononcé dans les pays développés principalement entre les pays membres de l'Union Européenne

rassemblement des données, et nous montrons que les résultats sont sensibles à la granularité sectorielle qui décrit notre image initiale. Au-delà de cet "inventaire" pour une année de référence, nous avons développé une méthode que nous articulons avec le modèle d'équilibre général *IMACLIM-S FRANCE*, pour être en mesure d'analyser les effets d'une politique domestique sur les échanges extérieurs, en valeur, ainsi qu'en volume d'émissions. Des développements futurs permettront de prolonger l'analyse à d'autres mesures telles que l'ajustement d'une taxe carbone aux frontières.

Conclusion

Malgré les grands progrès de la modélisation E3, des efforts importants doivent se poursuivre sur la transparence des représentations, leurs limites et leurs incidences sur les résultats. Les modèles hybrides "complexes" offrent des informations pertinentes pour l'élaboration de politiques, mais leur validation nécessite du temps pour comprendre les mécanismes sous-jacents et éviter de les considérer comme des "boîtes noires".

En s'appuyant sur l'économie française, cette thèse fournit un cadre de modélisation capable de contribuer aux débats sur les contributions-climat nationales et leurs implications, tout en améliorant la précision des modèles pour l'aide à la décision des politiques.

Dans un premier temps, la thèse remet en question les limites des outils de modélisation macroéconomique pour l'analyse de la politique climatique tout en clarifiant les approches techniques suivies. Le travail commence par la construction de la base de données hybride à un niveau de granularité sectorielle suffisant pour mettre en avant des impacts différenciés d'une politique environnementale ambitieuse. Par rapport aux travaux précédents, nous allons plus loin dans l'hybridation des données en rassemblant de nombreuses sources d'information (bilan énergétique, études sectorielles, etc.) pour aboutir à une description duale de notre économie en flux monétaire et physique sur l'énergie, le ciment et l'acier. En modifiant de façon significative l'image initiale de l'économie, nous confirmons l'intérêt de la méthode d'hybridation. D'abord, par rapport à des modèles qui ne font pas l'effort du traitement des données, nous réduisons le coût d'une politique climatique. Ensuite, la procédure permet d'ouvrir la boîte des modèles compacts pour aller vers un gain en granularité sectorielle. Finalement, au-delà d'une capacité à mieux assurer le lien avec les études techniques, elle permet aussi de mieux comprendre les mécanismes économiques.

En développant une nouvelle version du modèle *IMACLIM-S FRANCE*, nous nous intéressons à mieux comprendre les interactions entre régime de formation des salaires et échanges extérieurs au travers de paramètres controversés (élasticités-prix des échanges extérieurs, et sensibilité des salaires au chômage) dont nous rappelons la sensibilité d'abord à un niveau agrégé de la

modélisation.

Nous montrons ensuite l'incidence d'un gain en précision sectorielle pour l'analyse de la politique. En ouvrant la boîte d'un modèle compact, nous définissons une représentation des interactions, secteur par secteur, entre emplois exposés et problème de compétitivité. Plus particulièrement, l'introduction d'un nouveau paramètre de modélisation nous permet de lier la dynamique salariale au degré d'exposition de l'économie.

Au-delà des résultats montrés, la contribution concrète de cette thèse est d'avoir mis en place une plateforme de modélisation qui permet de rassembler des expertises souvent éclatées pour s'appuyer sur des informations plus précises et documentées. Cela permet de réduire les incertitudes sur l'évaluation de la politique climatique tout en capitalisant progressivement sur les analyses sectorielles.

L'outil peut nourrir pleinement le débat de la transition bas carbone en France, sous contrainte de compétitivité, en étudiant dans quelles mesures elle peut profiter à la relance domestique par les investissements. De fait, la thèse met en évidence des mécanismes macroéconomiques sans prétendre apporter une réponse définitive à une question qui demande des analyses supplémentaires, et un débat économique et sociale.

Finalement, la plateforme IMACLIM -pays construite autour du cas français a été développée en anticipant des besoins de nouvelles capacités de modélisation pour d'autres économies. Grâce à une grande modularité du modèle, elle sera facilement étendue à d'autres économies. Dans une perspective plus large, le déploiement de la plateforme à de nombreux pays permettra de conduire des exercices de comparaison inter-économies, dans un cadre cohérent pour une même politique environnementale, complémentaires aux exercices mondiaux.