



HAL
open science

Construction de matrices entrées-sorties en indicateurs physiques et en valeur monétaire pour les modèles d'équilibre général hybrides : application à l'économie brésilienne

Julien Lefevre, Emmanuel Combet, Jean Charles Hourcade

► To cite this version:

Julien Lefevre, Emmanuel Combet, Jean Charles Hourcade. Construction de matrices entrées-sorties en indicateurs physiques et en valeur monétaire pour les modèles d'équilibre général hybrides : application à l'économie brésilienne. 2013. <hal-01685990>

HAL Id: hal-01685990

<https://hal.science/hal-01685990v1>

Preprint submitted on 16 Jan 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization



Les Cahiers de la Chaire

Chaire Modélisation prospective au service du développement durable

Construction de matrices entrées-sorties en indicateurs physiques et en valeur monétaire pour les modèles d'équilibre général hybrides : application à l'économie brésilienne.

**Julien Lefèvre, Emmanuel Combet
et Jean-Charles Hourcade**

Mai 2013

Working Paper N° 2013-02-09

Construction de matrices entrées-sorties en indicateurs physiques et en valeur monétaire pour les modèles d'équilibre général hybrides : application à l'économie brésilienne.

Julien Lefevre, Emmanuel Combet et Jean-Charles Hourcade

CIRED, Campus du Jardin Tropical, 45 avenue de la Belle Gabrielle 94736 Nogent sur Marne cedex
Lefevre@centre-cired.fr, combet@centre-cired.fr, hourcade@centre-cired.fr

Résumé :

Ce papier développe une méthodologie de mise en cohérence des données économiques (comptes nationaux) avec les données des bilans de « matière » (bilans énergétiques, etc.) pour calibrer les modèles d'équilibre général des interfaces économie-énergie-environnement. Les difficultés à combiner ces systèmes statistiques, souvent passées sous silence dans les modèles existants, nous incitent à remobiliser les exigences théoriques de la description des flux économiques à la fois en valeur monétaire et en volumes « physiques ». Il en résulte une méthode d'*hybridation* originale des données qui consiste à s'appuyer sur les flux de matière et des données de prix pour délimiter le circuit des biens matériels au sein du système économique sans altérer la taille de ce dernier. Cette procédure sera appliquée pour construire un tableau entrées-sorties *hybride* à 18 secteurs pour le Brésil en 2005.

Abstract

This paper describes a methodology to make consistent economic data (national accounts) and data from "material" balances (energy balances, etc) in order to calibrate energy-environment-economy CGE models. The difficulties often underestimated in existing models to combine those data bases, push for reexamining the theory governing the description of the economic flows both in monetary value and in "physical" volumes. It results in an innovative process of *hybridization* of data which consists in relying on material flows and data on prices to delimit the cycle of material goods within the entire economic system without modifying the size of the economy. We apply the protocol to build a *hybridized* Input-Output table with 18 sectors for Brazil in 2005.

Key words : modèle hybride, hybridation, tableaux entrées-sorties, bilans énergétiques

Acknowledgment

This research was supported by the Chair Modeling for sustainable development, driven by MINES ParisTech, Ecole des Ponts ParisTech, AgroParisTech, and ParisTech, supported by ADEME, EDF, RENAULT, SCHNEIDER ELECTRIC and TOTAL.

Introduction

Depuis quelques temps, certains spécialistes de la modélisation intégrée économie – énergie – environnement font valoir l'intérêt de développer des modèles dits « hybrides » qui décrivent simultanément les flux physiques et les flux monétaires qui circulent dans une économie (Hourcade *et al.* 2006)

Ce plaidoyer est l'aboutissement des débats récurrents entre modèles *bottom-up* (longtemps appelés en France *modèles technico-économiques*, dans la tradition de MEDEE, de EFOM ou de MARKAL) qui donnent une description fine des technologies mais raisonnent « à économie donnée » sans prendre en compte les conséquences économiques des politiques publiques destinées à enclencher des mutations techniques et les modèles *top-down* qui décrivent les flux économiques mais au prix d'une représentation fruste des systèmes techniques.

Certes, comme le soulignait le deuxième rapport du GIEC (SAR, 1995), la frontière entre les deux approches tend à se rapprocher mais le diagnostic porté par Edmonds et Grubb (Grubb *et al.* 1993) sur la nécessité et les difficultés du dialogue entre ingénieurs et économistes reste globalement valide. Un obstacle majeur à un tel dialogue est l'absence de systèmes de comptabilité qui permette une prise en compte cohérente des flux économiques, des flux d'énergie et des flux de « matière » dans une économie à une date donnée. C'est une méthode qui permette de produire de tels systèmes de comptabilité malgré la difficulté de données manquantes que nous présentons dans ce texte, ceci pour des économies nationales.

Après avoir brièvement rappelé les justifications théoriques et méthodologiques des systèmes hybrides de comptabilité des flux économiques, nous en donnons les principes de construction avant de décrire une méthode systématique que nous illustrons sur le cas du Brésil.

1. Pourquoi l'hybridation des matrices de comptabilité sociale ?

Historiquement, les débats sur l'évaluation des politiques énergétiques et climatiques se sont cristallisés autour de l'opposition récurrente entre vision d'ingénieur (*bottom-up* (BU)) et d'économiste (*top-down* (TD)). Les ingénieurs étudient la compétition entre technologies en équilibre partiel via la représentation explicite des dotations en ressource énergétique et des contraintes en jeu dans les processus de production et de consommation. Ils analysent les politiques climatiques en termes purement technologiques et décrivent la réaction des systèmes techniques à un ensemble de politiques où de chocs exogènes sur les prix des énergies pour en déduire le plus souvent les implications en termes de besoins d'investissement. Mais les limites de ces modèles sont évidentes et assumées par leurs constructeurs, même s'ils sont parfois utilisés dans les débats publics au-delà de leur domaine de compétence¹. Ils sont certes alimentés, en entrée, par des scénarios économiques qui fournissent les paramètres gouvernant les divers postes de demande énergétique (valeurs ajoutées pour les secteurs industriels, revenus pour les ménages) et des profils de prix des énergies sur l'horizon projeté. Mais ils ne prétendent pas en

¹ Par exemple lorsqu'on utilise un modèle comme PRIMES (Capros, 1998) pour discuter de l'allocation des quotas d'émission pour le secteur industriel en Europe, alors que ce modèle raisonne « à structure industrielle constante », c'est-à-dire ne peut saisir d'éventuels effets de compétitivité des contraintes carbone pesant sur telle ou telle industrie d'un pays donné.

effet intégrer les rétroactions du changement des systèmes techniques sur le reste de l'économie (propagation des prix, effets d'éviction des investissements dans les secteurs énergétiques, rétroaction du progrès technique sur la demande, etc). Ce sont ces effets d'équilibre général que prennent en compte les modèles *top-down*, pour cerner les impacts des politiques énergétiques, climatiques et environnementales sur l'activité, l'emploi et la compétitivité.

Les limites des modèles d'équilibre général *top-down* sont moins évidentes à saisir. Qu'ils s'appuient sur des visions très agrégées de l'économie (modèle MACRO) ou sur une désagrégation sectorielle plus fine (GREEN (Burniaux et al., 1991), EPPA (Paltsev et al., 2005)), ils projettent bien en principe des économies sous-tendues par un contenu physique. Néanmoins, la description de ce contenu physique ne fait en général appel à aucune connaissance d'ingénieur. Il est en quelque sorte traité « par subrogation », c'est-à-dire en représentant les relations entre les équipements physiques, les consommations intermédiaires (parmi lesquelles l'énergie) et le travail sous forme de « fonction de production macro-économique » en lieu et place des fonctions d'ingénieur. Il en est de même pour la représentation des déterminants de la demande par les fonctions d'utilité. Cet usage généralisé de la fonction de production constitue un véritable réflexe méthodologique emprunté à la « boîte à outil » de référence du modélisateur, dans un contexte d'essor des modèles d'équilibres général calculables depuis l'explosion des capacités de calcul numérique dès la fin des années 80.

Cette pratique repose sur ce que Solow appelle des « astuces » mathématiques (« wrinkle ») où, une fois choisie une fonction mathématiquement tractable (Cobb-Douglas, CES (Constant elasticity of substitution), Translog) on dérive les quantités et les possibilités de substitution technique à partir des parts des facteurs dans les coûts de production telles qu'elles apparaissent dans les comptes des secteurs productifs ou selon sur les coefficients budgétaires qui caractérisent les dépenses des ménages. Ce procédé repose sur une extension généralisée du théorème de l'enveloppe (lemme de Shephard et identité de Roy) qui n'est en fait valable que dans le cas où les facteurs de production sont rémunérés à leur productivité marginale, en supposant un fonctionnement parfait des marchés. Il permet de définir les choix de production et de consommation de l'ensemble de l'espace temporel d'étude du modèle uniquement à partir de quelques valeurs d'élasticités exogènes et d'une table entrées-sorties à une seule année (dans le cas des modèles multi-sectoriels). Solow met pourtant lui-même en garde contre toute interprétation de la fonction de production en termes de contenu physique et technique.²

Ce procédé pratique est bien sur très éloigné de la représentation des possibilités techniques telle que la conçoit l'ingénieur³. A la limite, on n'est pas assuré que, réagissant à des signaux prix très

² *“This ‘Wrinkle’ is acceptable only at an aggregate level (for specific purposes) and implies to be cautious about the interpretation of the macroeconomic production functions as referring to a specific technical content.”*

³ Dans un modèle « bottom-up », une substitution pétrole-gaz par exemple sera représentée via un changement de technologie et le ratio de substitution pétrole-gaz (nombre d'unités de gaz en plus pour remplacer une unité de pétrole qui n'est plus consommée) va dépendre uniquement des rendements relatifs de transformation du pétrole et du gaz en service énergétique final. Avec une fonction de production classique, la substitution s'opère selon une certaine élasticité, reliant les *pourcentages* d'augmentation du gaz consommé et de diminution du pétrole consommé aux variations des prix relatifs, si bien que le ratio de substitution *en quantité* dépendra des parts initiales de pétrole et de gaz dans le mix énergétique du secteur, ce qui semble aberrant d'un point de vue technologique.

élevés par rapport à la trajectoire de référence, ces fonctions ne décrivent pas des mondes techniques incompatibles avec les lois de la thermodynamique (McFarland, 2004).

Ce faisant c'est la représentation générale du contenu « matériel » de la croissance et son évolution qui est insatisfaisante. Elle devient difficilement tenable lorsqu'on envisage des chocs violents sur les prix des énergies ou des ruptures aussi franches que le « facteur 4 » qui impliquent une réorientation massive des investissements, des changements structurels et posent des questions de redéploiement géographique des activités. Cette persistance méthodologique est sûrement à mettre en relation avec le succès de la métaphore de Manne et Rutherford, celle du ragoût fait d'un éléphant et d'un lapin qui dit que ce qui arrive dans le secteur énergétique (2 à 3% du produit intérieur brut) importe peu pour l'analyse macro-économique. Elle avait été utilisée à l'époque pour justifier le couplage entre le modèle ETA du secteur énergétique et du module macroéconomique agrégé MACRO qui représente une des premières tentatives de construction de modèles dits « hybrides ». Mais ce dispositif de modélisation ne permet de résoudre la question des dynamiques intersectorielles (propagation des prix entre secteurs) ou du commerce international. Des essais d'hybridation de modèles existants ont été réalisés (voir la distinction soft link/hard link de Böhringer (Böhringer, 2008)) mais il ne s'agit pas d'architectures de modélisation conçues comme hybrides dans leur fondement.

Pour construire de telles architectures, il convient de **restaurer les conditions de contrôle de l'interface entre systèmes économiques et systèmes techniques** et donc de disposer de dispositifs comptables hybrides par construction pour cerner les flux au sein d'une économie. Dans cette optique il faut revenir à une interprétation « au pied de la lettre » de l'axiomatique d'Arrow-Debreu, qui part d'une représentation duale des objets économiques (en quantité physique et en valeur monétaire) reliées par un vecteur de prix. Le fait qu'on se réfère ici à un cadre d'équilibre général ne signifie pas que l'on fasse automatiquement référence à un système de marchés parfaits ; il s'agit simplement d'équilibre comptable à travers l'équilibre simultané des échanges physiques et monétaires et la cohérence quantité-valeur à travers le système des prix. Un tel schéma permet de s'assurer que l'économie simulée repose sur des systèmes techniques plausibles (y compris lorsqu'on est très loin de l'équilibre de référence, après changements techniques drastiques) et qu'à l'inverse les systèmes techniques projetés s'insèrent bien dans un cadre macroéconomique cohérent. Ce cadre comptable permet de relier, comme le font les modèles IMACLIM (Sassi *et al.*, 2010) ou SGM (Fawcett et Sands, 2005), l'évolution des coefficients de volume physique à des représentations physiques tangibles empruntées aux modèles technico-économiques.

En pratique il s'agit de reconstituer une matrice de comptabilité sociale duale en valeur et en quantités physiques en superposant puis combinant des tableaux de données macroéconomiques en valeur monétaire et des bilans en flux physiques (comme les flux énergétiques) et de les relier à un même jeu d'indicateurs matériels (indicateurs spatiaux (m²), distances (passager.km), etc.).

Ce type de travaux s'est historiquement heurté à des difficultés de disponibilité des données et des contraintes calculatoires. Mais une meilleure disponibilité de ces données, y compris au niveau sectoriel et les progrès dans les capacités de calcul et les techniques de récupération d'informations manquantes permettent aujourd'hui de rendre opérationnel ce qui était naguère très coûteux à réaliser.

2. Procédure d'hybridation et mise en cohérence de données disparates

On appellera *procédure d'hybridation* l'ensemble des manipulations consistant à mettre en cohérence données macroéconomiques de la comptabilité nationale et données issus des bilans de matières et/ou d'indicateurs physiques tangibles et qui permet de reconstituer une image *hybride* harmonisée d'une économie à l'année de base pour la calibration des modèles d'équilibre général hybrides.

La description duale de la « circularité économique » des biens en valeur et en volumes « physiques » repose sur deux principes :

- **La description « physique » et en valeur monétaire respectent simultanément le principe de conservation:** tout usage suppose la disponibilité d'une ressource et toute ressource a nécessairement un usage (même s'il s'agit de sa destruction ou de son stockage). C'est un principe de cohérence analogue au principe de conservation de la masse en physique.
- **Les flux « physiques » et monétaires sont reliés entre eux par un système de prix** et la valeur économique totale associée à chaque opération sur le circuit des biens (production, échange, consommation...) correspond alors exactement au produit d'un volume agrégé par un prix.

Dans une économie à plusieurs secteurs, ces principes théoriques se traduisent par le système d'équations simple suivant :

$$\left\{ \begin{array}{ll} \forall i, & \sum_E Q_{i,E} = \sum_R Q_{i,R} \quad \text{Equilibres Emplois-Ressources en quantités} \\ \forall i, & \sum_E V_{i,E} = \sum_R V_{i,R} \quad \text{Equilibres Emplois-Ressources en valeurs} \\ \forall (i,o), & V_{i,o} = P_{i,o} * Q_{i,o} \quad \text{Cohérence Quantités-Valeurs} \end{array} \right.$$

Où Q, ensemble des agrégats de quantités (en unité « physique », Mtep par exemple)

V, ensemble des agrégats de valeurs (en unité monétaire, M€)

i, ensemble des agrégats de bien

o, ensemble des agrégats d'opérations économiques

R, sous-ensemble d'opérations liées aux ressources (production, importation, déstockage, etc.)

E, sous-ensemble d'opérations liées aux emplois (consommation, investissement, export, etc.)

P, vecteur des prix moyens associés à chaque opération engageant un bien.

a. *Un exemple de mise en cohérence : tableaux entrées-sorties (TES) et bilans énergétiques*

Parmi tous les flux physiques, les flux d'énergie présentent l'avantage de pouvoir être agrégés dans une métrique commune, via leur contenu en chaleur (puis exprimés en Mtep, Mtec, BTU, Joules, etc) et des bilans énergétiques annuels consolidés sont disponibles.

Dans la figure 1, on donne le schéma d'une hybridation des flux en valeur et en volume physique des commodités énergétiques dans une économie et les liens théoriques entre :

- **Les tableaux entrées-sorties (TES)** qui font le bilan en valeur monétaire des ressources et emplois des différents biens et services de l'économie dans une logique entrées-sorties à deux dimensions et selon différents niveaux disponibles d'agrégation sectorielle. Les colonnes font le bilan de la structure des ressources des différents agrégats en distinguant consommations intermédiaires en valeur monétaire (matrice V), valeur ajoutée (VA) et importations (M). Les lignes font le bilan des emplois de ces mêmes agrégats en reprenant les consommations intermédiaires et en ajoutant les consommations finales (consommations des ménages (C), consommations des administrations publiques (G), formation de capital fixe (I), exportations (X)). L'égalité emplois-ressources est assurée par construction.
- **Les bilans énergétiques (BE)** qui font le bilan des flux énergétiques annuels (en Mtep) des processus de transformation pour la production d'énergie finale et de consommation de cette énergie finale dans les différents secteurs économiques selon les sources d'énergie principales. Ce type de système statistique rend possible une réorganisation des données dans une logique emplois-ressources avec en emploi les consommations intermédiaires énergétiques des secteurs productifs (Q), y compris les transformations au sein du secteur énergétique, les consommations finales (C, X) et en ressources les volumes produits (P) et importés (M).

La concrétisation du schéma décrit en figure 1 se heurte en fait à une série de contraintes pratiques que la procédure d'hybridation s'attache justement à lever.

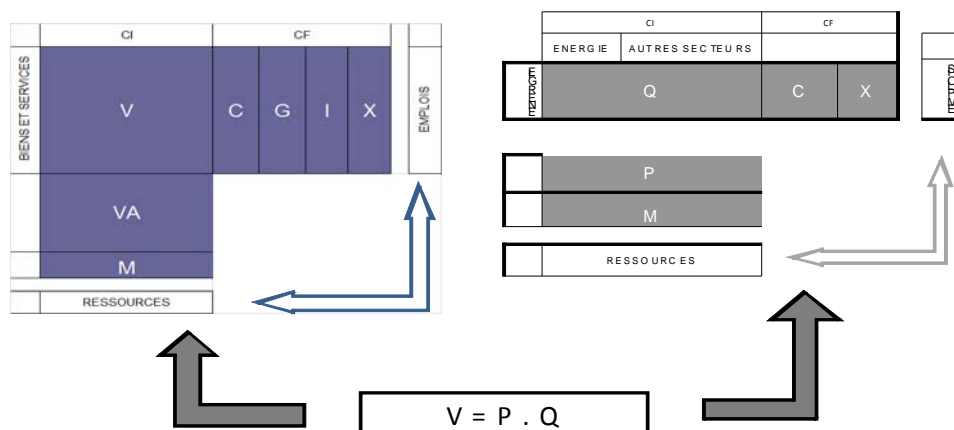


Figure 1: Egalité emplois-ressources en valeurs dans le TES (à gauche) et en volumes physiques dans le bilan énergétique restructuré (à droite) / Cohérence quantités-valeurs

b. Contraintes de métrique pour gérer l'hétérogénéité des biens

Le défi est ici de sortir du cadre habituel qui consiste à travailler à partir de « volumes » qui ne sont en fait que des indicateurs construits en ramenant à des prix constants des séries d'informations statistiques en valeur monétaire⁴. Pourtant la valeur monétaire est bien en théorie la seule métrique qui permette de tenir compte de l'hétérogénéité des biens en les agrégeant selon leur valeur économique⁵. Ces « pseudo-quantités », obtenues par normalisation des prix, permettent d'appliquer l'analyse économique standard pour étudier les variations de court et moyen terme en intrants physiques des secteurs productifs en fonction des « pseudo-prix » relatifs. Néanmoins ce procédé pratique et économe en travail sur les données ne permet pas le contrôle pourtant crucial des flux physiques sous-jacents à des analyses de long terme (disponibilité des ressources, mix énergétique, usage des terres, etc.) et rend compliquée la description des systèmes techniques empruntée aux ingénieurs.

Une façon de s'en tirer est de recourir à des quantités physiques tangibles. Reste les problèmes d'agrégation de biens hétérogènes par des métriques physiques pertinentes et en la matière, seul compte le choix des niveaux d'agrégation par rapport à ce que l'on souhaite représenter. Si l'on souhaite s'en tenir à la description de la substitution entre charbon et gaz dans la production électrique, il suffit de disposer des quantités agrégées en Mtep des deux ensembles de combustible associées à des prix moyens de ces agrégats. Peu importe ici l'hétérogénéité du charbon ou du gaz à une échelle plus fine (Il existe en pratique de multiples types de charbon et de gaz). Disposer des quantités énergétiques de charbon et de gaz calculées grâce à leur contenu calorifique moyen couplées à des informations sur le rendement des technologies de production électrique et les besoins en travail et capital respectifs, permet la représentation de la compétition charbon-gaz selon une logique d'ingénieur. On peut en même temps effectuer la comptabilité des émissions carbonées sous-jacentes en lien avec les contenus calorifiques. Ce type de métrique existe également pour les biens agricoles pour lesquels on peut utiliser les calories alimentaires⁶ avec le même raisonnement sur les niveaux d'agrégation.

Au-delà la seule métrique possible est la masse. Mais si les tonnes de ciment, d'acier, de papier ou d'aluminium peuvent être considérées comme des indicateurs pertinents, l'hétérogénéité économique et physique des produits devient très vite un obstacle. On pourra le contourner, par exemple pour la pétrochimie, en prenant les tonnes de « feedstocks » traitées comme indicateur du niveau de production physique mais il faudra en rabattre un peu sur l'ambition initiale pour boucler les bilans par un « bien composite » en valeur dont l'indicateur de « volume » ne pourra être interprété dans un langage d'ingénieur. Le choix du niveau d'agrégation de ce bien composite dépendra bien sûr des besoins de la modélisation (on pourra y agréger le secteur agricole si on ne s'intéresse par exemple qu'aux réactions de la sidérurgie aux contraintes climatiques).

Soulignons enfin que si des bilans énergétiques consolidés sont régulièrement publiés, les bilans de flux de biens agricoles sont bien moins systématiques⁷ et les données sur les tonnages de

⁴ Au prix des difficultés de construction des indices associés: Laspeyres, Paasche

⁵ Paltsev et al. 2005

⁶ Dorin 2010, Brunelle 2010

⁷ Il existe par exemple les bases de données de FAOSTAT, le module Agribiom (Dorin et Le Cotty, 2010)

ciment, d'acier, etc, sont très disparates, ce qui complique en pratique la mise en œuvre d'une procédure d'hybridation systématique au-delà des flux énergétiques.

c. *Contraintes de nomenclature*

Le recours à des indicateurs physiques fournit par ailleurs un moyen d'enrichir la délimitation des circuits de biens matériels dans l'économie par les écarts statistiques et de nomenclature qui apparaissent dans la confrontation entre les bilans de matière et les comptes nationaux.

Car les sources d'imperfection sont multiples dans la construction de ces bilans consolidés: aux erreurs de mesure s'ajoutent les nombreux traitements rendus nécessaires pour rassembler, extrapoler, harmoniser, consolider les sources primaires et construire les tableaux synthétiques. La construction de ces tableaux nécessite donc de nombreux traitements pour compiler les données et assurer les équilibres emplois-ressources. Or ces opérations sont menées par des statisticiens qui travaillent séparément. C'est pourquoi la cohérence quantité-valeur (deuxième principe) n'est pas assurée dans le sens où la simple superposition des tables énergétiques, par exemple, et des tables économiques fournit un système hybride avec des prix différenciés des énergies irréalistes masquant un ensemble de difficultés à lever.

Ainsi dans le cas du Brésil en 2005, la valeur économique totale des *biens énergétiques issus du raffinage du pétrole (carburants liquides et gazeux)* est évaluée⁸ à 167 milliards de reais brésiliens (R\$) une fois les données de la balance énergétique multipliées par les prix observés contre 188 milliards dans le tableau entrées-sorties de la comptabilité nationale, soit 13% de plus. Pour l'électricité le différentiel est de 67% ... (100 contre 167 milliards). Sur le cas de la France en 2004, la même valeur des *biens énergétiques issus du raffinage du pétrole* est évaluée à 67,5 milliards⁹ d'euros contre 93 milliards dans les données de l'INSEE, soit un différentiel de 38%.

Au-delà des erreurs et biais de consolidation des données, l'origine essentielle de ces écarts réside dans les **différences de nomenclature et de concepts statistiques** entre TES et BE.

Effectivement le contenu en produits des agrégats « énergétiques » de la nomenclature TES ne recoupe en général pas les produits énergétiques que l'on souhaite isoler. Par exemple dans le même cas du Brésil:

- L'agrégat « produits issus du raffinage du pétrole et du coke » inclut entre autres les combustibles de l'industrie nucléaire et les produits pétroliers raffinés utilisés comme matières premières dans la production de produits divers non combustibles qui peuvent être à très forte ou à très faible valeur ajoutée par tonne (bitumes vs solvants)
- L'agrégat « électricité, gaz, eau et réseaux urbains » inclut, outre production et distribution électrique et une partie du gaz combustible, divers services de commerce, de transport et de distribution qui ont une valeur ajoutée non négligeable et qui ne sont pas liés à la formation des prix de l'électricité (approvisionnement en eau, etc)

⁸ Cf. section 3. pour les modalités précises de calcul

⁹ A partir de données AIE

Dès lors si l'on retient sans précaution ces niveaux d'agrégation pour l'estimation de la valeur ajoutée des carburants fossiles d'une part et de l'électricité d'autre part, on débouche sur une surestimation de la valeur économique de ces agrégats de biens énergétiques lorsqu'on rapporte les valeurs ajoutées aux quantités du bilan énergétique.

Examinons à présent comment ces difficultés sont traitées dans les principaux modèles Energie-Économie-Environnement qui ont fait le choix d'une description duale des flux économiques liés aux biens énergétiques (A notre connaissance aucun modèle d'équilibre général hybride n'intègre aujourd'hui des flux physiques au-delà des biens énergétiques).

d. Méthodes d'hybridation des flux énergétiques : état de l'art et diagnostic

Caractériser une méthode d'hybridation revient à identifier les variables dont la valeur est conservée par rapport aux statistiques sources (« variables fixes ») et les variables dont la valeur est modifiée pour combler les écarts statistiques et satisfaire les identités comptables (« variables ajustées »). Les méthodes d'hybridation existantes peuvent être distinguées en fonction du choix des variables fixes et ajustées et selon les procédés techniques utilisés pour effectuer les ajustements. Nous décrivons dans la suite trois méthodes d'hybridation existantes pour illustrer le type d'arbitrages nécessaires pour construire des matrices hybrides. Ces méthodes sont déjà utilisées dans le cadre des modèles mondiaux Energie-Environnement-Economie comme EPPA (Paltsev et al., 2005), GEMINI-E3 (Bernard and Vielle, 2003) et SGM (Fawcett and Sands, 2005).

La plupart des systèmes hybrides partent de la base de données du GTAP (*Global Trade Analysis Project*) qui fournit un système de comptes régionaux harmonisés à l'échelle mondiale. Ce système a été modifié pour créer la base de données GTAP-E et introduire des données additionnelles sur les volumes et prix associés aux flux énergétiques bilatéraux. Plus précisément, la méthode utilisée consiste à recourir à des données de prix pour convertir les flux commerciaux monétaires d'énergie en flux en volume et restaurer la cohérence de ces volumes dérivés avec les totaux des bases en volume. Ces flux bilatéraux en volume sont ensuite reconvertis en flux monétaires grâce aux données de prix et de marges de GTAP et sont réintroduits dans les flux commerciaux du système de GTAP (Malcolm and Truong, 1999). L'écart statistique est ainsi reporté sur les flux domestiques (valeur ajoutée et quantités énergétiques, Mc Dougal et Lee, 2006), ce qui introduit potentiellement des biais importants sur les usages énergétiques régionaux. A titre d'exemple (Sands, 2005) rapporte que pour la version GTAP-E dérivée de la base GTAP 5.0, ces ajustements entraînent la division par deux de la valeur ajoutée du secteur électrique en Chine (1997) par rapport aux statistiques primaires ou encore l'augmentation de 37% de la consommation de charbon dans la production électrique.

Ces biais étant problématiques pour l'analyse des politiques énergétiques et/ou climatiques, un autre procédé a été développé pour créer la base GTAP-EG. La méthode employée vise à conserver les statistiques de quantités et prix énergétiques (Rutherford et Paltsev, 2000). Dans ce cas les écarts statistiques sont reportés sur la valeur ajoutée des secteurs énergétiques avec modification des niveaux de PIB régionaux.

Les concepteurs du *Second Generation Model* (SGM, aujourd'hui modèle Phoenix) (Fawcett, 2005) adoptent une méthode de nature différente. Le principe consiste à conserver les flux énergétiques physiques et les valeurs ajoutées des branches énergétiques du système de comptabilité monétaire et à calculer un vecteur des prix moyens de chaque secteur énergétique (indépendamment de l'usage) qui restaure les équilibres emplois-ressources. Ce vecteur des prix des énergies, de taille n , est simplement calculé par résolution du système des n équations linéaires d'équilibre emplois-ressources des n secteurs énergétiques. Cette méthode permet de corriger les principaux biais précédemment identifiés et de conserver les flux régionaux d'énergie et les niveaux de PIB.

Mais cette procédure pose deux problèmes :

- Le premier est celui du calcul d'un prix unique moyen des biens énergétiques alors qu'il existe en pratique une grande hétérogénéité des tarifs selon les différents grands types d'agents consommateurs¹⁰. Cette méthode débouche donc sur une ventilation incorrecte de la facture énergétique totale entre secteurs productifs et ménages. Or il y a une grande richesse de l'information disponible sur l'hétérogénéité des tarifs de l'énergie.
- Le deuxième est celui des niveaux d'agrégation, de la « bonne » valeur économique des biens énergétiques et des écarts de nomenclature (cf 2-c). Effectivement, le processus attribue aux biens énergétiques la valeur ajoutée tirée des comptes nationaux sans discuter les écarts potentiels mis en évidence dans la partie précédente. Il en résulte dans l'ensemble une surestimation du prix moyen des biens énergétiques puisque cohérents par le calcul avec des valeurs ajoutées en général surévaluées.

Bases de données hybrides	Systèmes statistiques sources (valeurs / quantités)	Variables fixes	Variables ajustées
GTAP-E	International (GTAP / IEA)	Aucune	PIB Quantités d'énergie Valeur ajoutée des secteurs énergétiques Prix des énergies
GTAP-EG	International (GTAP / IEA)	Quantités d'énergie Prix des énergies	PIB Valeur ajoutée des secteurs énergétiques
SGM	National ou International	Quantités d'énergie Valeur ajoutée des secteurs énergétiques	Prix des énergies

Figure 2 : Comparaison des principaux procédés d'hybridation.

¹⁰ Le prix à la consommation de l'électricité peut varier du simple au double entre certains secteurs industriels et les ménages par le jeu de marges spécifiques en fonction des types de contrats en jeu.

3- Une méthode d'hybridation

Les considérations de la section précédente militent pour la mise en œuvre d'une procédure qui soit en mesure de produire un système hybridé respectant les deux contraintes de cohérence fondamentales (cf 2-a) sans altérer les statistiques primaires qui comptent pour l'évaluation des politiques climatiques et énergétiques (quantités, prix et contenu carbone des énergies d'une part, taille et contenu de l'économie nationale d'autre part).

La procédure que nous proposons répond à ces exigences et favorise la description du « contenu physique » de l'économie en facilitant l'incorporation et la synthèse d'informations issues de sources statistiques diverses. Elle vise à être facilement adaptée selon les singularités d'un pays et la nature du problème traité. Elle part de la confrontation systématique des nomenclatures entre statistiques physiques, énergétiques et de comptabilité sociale. Cette confrontation permet de repérer les écarts dans la description des flux liés aux biens matériels entre les TES et les bilans de matière. Une fois reconstruit le flux de valeur attaché à un bien donné, cet écart est basculé vers les biens et services composites pour ne pas altérer la taille du système économique lui-même (la valeur du PIB donnée par les comptes nationaux par exemple).

Pour effectuer ce basculement, nous utilisons les bilans de matière et des données de prix pour reconstruire les factures en biens matériels de l'économie. La différence en valeur monétaire entre ces factures calculées et les consommations de biens telles qu'elles apparaissent dans le TES est alors attribuée à des biens et services qui ne sont dès lors pas supposés faire partie du circuit des biens matériels et que l'on agrège en emplois et ressources aux biens composites.

Dans la mesure où seuls les bilans énergétiques représentent des sources de données consolidées dans un format standard, nous décrivons dans la suite une méthode d'hybridation systématique détaillée des biens énergétiques. L'hybridation des biens agricoles et de l'industrie primaire suit la même logique mais la méthode doit s'adapter aux données disponibles. La description technique du protocole est assortie d'une illustration numérique très simplifiée sur le cas du Brésil pour l'année 2005. Une matrice hybride complète résultant de la méthode est incluse en annexe.

Techniquement la procédure comprend trois étapes: (1) production d'une matrice entrées-sorties en quantités énergétiques (Mtep) et (2) production d'une matrice de prix (Monnaie/Mtep) (Chaque prix est lié à une opération de production-circulation-consommation finale d'un bien énergétique selon le format et la nomenclature définis) et reconstitution d'une matrice entrées-sorties en valeur (facture énergétique) par le produit terme à terme des matrices en quantités et en prix, et (3) incorporation de cette matrice en valeur dans le système de comptabilité nationale qui suppose un réarrangement des nomenclatures et une caractérisation des produits énergétiques par leur structure de coût et de valeur ajoutée.

a. Etape préliminaire : production d'un TES « carré » en valeur monétaire

Le TES donné par la comptabilité nationale se présente sous forme d'un jeu de deux tables : une table des « emplois » et une table d'« offre » (*supply and use tables*, SNA 2008).

La table des « emplois », qui constitue le cœur du TES, fait le bilan en ligne des emplois en *produits* de l'économie, ventilés entre consommations intermédiaires pour les *secteurs*

productifs, consommations finales, formation de capital fixe et exports. En même temps, la table présente en colonne la structure des *ressources* dans une logique de *secteurs* en détaillant symétriquement leurs consommations intermédiaires en *produits* et la structure de leur valeur ajoutée. La logique d'agrégation est donc asymétrique entre les lignes et les colonnes avec d'un côté des *produits* et de l'autre des *secteurs*.

Les *secteurs* correspondent à une somme d'unités productives ayant une même activité principale. Les *produits* sont des agrégats de biens et/ou services plus ou moins semblables par nature¹¹. Techniquement, avec ce type de statistiques, il peut y avoir plusieurs produits dans la gamme de production de chaque secteur et on distingue la (ou les) production(s) principale(s) des productions secondaires (produits joints, coproduits, etc). De même un produit peut apparaître dans le panier de production de plusieurs secteurs. En pratique le nombre de produits est souvent supérieur au nombre de secteurs dans les statistiques primaires.¹²

		Secteurs			Usages finaux			Total emplois
		Agriculture	Industrie	Services	Conso. finale	FBCF	Exports	
Produits	Produits agri.	41	70	177	108	26	38	460
	Produits indus.	117	136	122	161	112	72	720
	Services	56	89	8	278	53	16	500
Valeur ajoutée		86	205	393				
Total production		300	500	700				

Figure 3: Exemple numérique d'une table d'emplois¹³

La table des « emplois » est alors assortie d'une table d'« offre » qui donne les informations sur les niveaux de production des *secteurs* par *produit* et sur les taxes à la consommation, les marges additionnelles et les imports.

		Secteurs			Taxes	Marges	Imports	Total ressources
		Agriculture	Industrie	Services				
Produits	Produits agri.	270	30	50	20	70	20	460
	Produits indus.	10	430	100	25	105	50	720
	Services	20	40	550	35	-175	30	500
Total production		300	500	700				

Figure 4 : Exemple numérique de table d'offre¹⁴

¹¹ En pratique il s'agit de produits et services qui correspondent à un même ensemble d'items de la nomenclature d'activité économique considérée.

¹² Dans notre exemple il suffirait de découper les produits agricoles en produits végétaux ou animaux ou encore les produits industriels en produits de l'industrie lourde et de la manufacture.

¹³ Le secteur *agriculture* a une production totale de 300 et utilise 41 de *produits agricoles*, 117 de *produits industriels*, etc pour réaliser sa production. L'économie utilise 460 de *produits agricoles* dont 108 consommés par les ménages.

¹⁴ Le secteur *agriculture* produit 270 de *produits agricoles* qui représentent sa production principale mais également 10 de *produits industriels* (certains biens agro-alimentaires classés comme biens industriels par

La calibration des modèles multisectoriels nécessite souvent de disposer d'une **réduction de cette comptabilité double produit-secteur à une comptabilité avec identité secteur-produit**. Dans ce cas le cœur de la table des emplois devient une table entrées-sorties « carrée » avec symétrie des items (et le cœur de la table d'offre est réduit à une matrice diagonale).

Pour certaines régions la comptabilité nationale fournit directement des tables symétriques (*Symmetric input-output tables* - SIOT)¹⁵ mais elles sont moins fréquentes que les tables d'emplois et d'offre. Il est donc nécessaire la plupart du temps de construire un TES symétrique.

Notre analyse est centrée sur les impacts économiques de la gestion des externalités dues à la consommation de certaines commodités physiques (combustibles fossiles par exemple). Cette approche nécessite de représenter les flux économiques liés à ces flux de matière, ce qui plébiscite une « approche produit » de la construction du schéma entrées-sorties symétrique.

Pour ce faire, on peut utiliser deux grandes hypothèses de transformation (Eurostat, 2008). Avec l'hypothèse de « technologie produit », on suppose que chaque agrégat de biens et services est « produit » selon une structure de coût macro qui lui est propre. Inversement, l'hypothèse de « technologie secteur » considère que chaque secteur a sa propre structure de coût quel que soit son portefeuille de produits. Dans la réalité aucun agrégat de produits ou secteurs n'obéit rigoureusement à l'une ou l'autre de ces hypothèses mais se rapproche plus ou moins de l'une ou l'autre selon ses caractéristiques (en fonction des types de produits agrégés : productions indépendantes, produits joints, etc).

En pratique, les différences de résultat entre les deux méthodes sont faibles sauf lorsque la valeur des productions secondaires des secteurs est vraiment importante¹⁶. Or comme nous le mettrons en évidence, dans notre méthode d'hybridation la distribution de valeur est pilotée par les données énergétiques et il est dès lors raisonnable d'utiliser la méthode la moins coûteuse en temps et travail pour effectuer la transformation.

L'hypothèse de « technologie secteur », même si elle est parfois moins réaliste à un niveau méso ou micro que l'hypothèse de « technologie produit », a l'immense avantage de ne pas engendrer par nature de valeurs négatives dans la matrice entrées-sorties symétrique obtenue. A contrario, la mise en œuvre de l'hypothèse de « technologie produit » nécessite un travail parfois lourd de correction des valeurs négatives¹⁷. Par conséquent, sauf dans certains cas particuliers (qui peuvent ne pas être négligeables), il convient d'utiliser l'approche « technologie secteur » pour construire le schéma entrées-sorties symétrique.

exemple) et 20 de *services* en tant que productions secondaires. Les *produits agricoles* sont également produits en quantité de 30 par le secteur *industrie* et 50 par le secteur *services*. En ligne, l'ajout des taxes, marges et imports aux niveaux de production domestique par produit donne le total des ressources en produits de l'économie qui est bien égal au total des emplois de la table précédente.

¹⁵ Cf. TES de l'INSEE qui propose une solution intermédiaire avec distinction entre produit et branche qui implique certains transferts de produits.

¹⁶ Dans l'agriculture brésilienne par exemple, on compte plus de 14% de production secondaire en valeur dans la production totale en 2005. Il s'agit soit de produits végétaux référencés dans l'élevage-pêche, soit de biens animaux produits dans des exploitations agricoles à dominante de cultures végétales. La répartition dépend de la définition des secteurs agriculture végétale/animale.

¹⁷ Liées précisément au fait que l'hypothèse n'est pas réellement vérifiée pour les secteurs. Le lecteur intéressé par cette problématique des valeurs négatives pourra se référer à Eurostat 2008.

		Produits			Usages finaux			Total emplois
		Produits agri.	Produits indus.	Services	Conso. finale	FBCF	Exports	
Produits	Produits agri.	54	87	147	108	26	38	460
	Produits indus.	122	138	115	161	112	72	720
	Services	56	80	17	278	53	16	500
Valeur ajoutée		118	235	331				
Total production		350	540	610				
Taxes		20	25	35				
Marges		70	105	-175				
Imports		20	50	30				
Total ressources		460	720	500				

Figure 5 : Exemple numérique du TES symétrique « produit-produit » obtenu par application de l'hypothèse de « technologie secteur »

La préparation du TES symétrique en valeur se termine par une étape d'agrégation sectorielle finale pertinente en regard de l'analyse souhaitée.

b. Transformation du bilan énergétique au format entrées-sorties

Il s'agit de réorganiser le bilan énergétique pour obtenir une table entrées-sorties en flux énergétiques (Mtep) « superposable » à la partie « énergie » du TES en valeur monétaire. Il faut pour cela remanier les données du bilan énergétique dans une logique :

- d'emplois d'un côté : consommations intermédiaires de quantités énergétiques pour la production énergétique elle-même, consommations intermédiaires énergétiques par les autres secteurs productifs (CI), consommations finales (CF) et exports (X)
- de ressources de l'autre : niveaux de production domestique (P) et imports (M)

		Conso. Intermédiaires		Demande finale		EMPLOIS
		Energie	Autres secteurs	Ménages	Exports	
Energie		CI		CF	X	
Prod.	P					
Imports	M					
		RESSOURCES				

Cette réorganisation des données est effectuée en suivant deux principes :

- L'adoption de la nomenclature TES pour la classification des biens énergétiques¹⁸ et la définition des secteurs consommateurs d'énergie (industries, ménages,...)
- La logique d'« emploi » de la comptabilité nationale qui est une logique de *consommation* et d'*achat* qui rassemble deux types de flux du bilan énergétique : les *transformations énergétiques* au sein du système énergétique (consommation de gaz naturel pour la génération électrique par exemple) et les *consommations d'énergie finale* (par les secteurs énergétiques eux-mêmes, l'industrie, le résidentiel, etc.)

En pratique, pour réaliser cette étape il faut disposer : (1) d'une correspondance aussi précise que possible entre les nomenclatures du bilan énergétique et de la comptabilité nationale pour les biens énergétiques, (2) de diverses sources complémentaires d'informations quantifiées ou, à défaut, d'hypothèses de travail sur les grandeurs inconnues pour permettre la réorganisation du bilan énergétique selon le format entrées-sorties.

	Fossiles prim.	Prod. pétroliers	Hydrau.	Electricité
Production	100	0	28	0
Imports	36	5	0	3
Exports	-14	-13	0	0
Centrales élec.	-6	-3	-28	34
Raffineries	-88	80	0	-1
Auto-cons.	-1	-5	0	-4
Industrie	27	6	0	12
Transport	0	42	0	0
Résidentiel	0	7	0	9
Autres secteurs	0	3	0	11
Non ener.	0	6	0	0

Figure 6 : Bilan énergétique source simplifié du Brésil (2005) (Mtep)¹⁹

Le travail commence par une **réduction du bilan énergétique source** en retirant certains flux spécifiques. C'est le cas des flux d'énergie « primaire » hydraulique, éolienne ou solaire, etc qui n'ont pas de contrepartie économique car ils ne s'échangent pas sur un marché. Malgré tout ces quantités ne disparaissent pas : dans l'exemple, les 28 Mtep d'énergie « primaire » hydraulique contribuent aux 34 Mtep de production électrique vendus aux consommateurs. Les coûts de production associés sont comptabilisés dans le TES via les coûts de construction des barrages, les flux de matériaux, etc. Plus généralement ce type de réduction porte sur les autoconsommations, les pertes, en fonction des règles comptables du TES (selon comment ces quantités énergétiques sont comptabilisées dans le coût de production des secteurs énergétiques)²⁰. Enfin, les flux non-énergétiques sont écartés du bilan (au prix d'un ajustement des niveaux de production²¹) et leur contrepartie économique est agrégée au bien composite.

¹⁸ Il s'agit pour chaque bien énergétique d'identifier son pendant de la comptabilité nationale et en pratique d'identifier dans quel agrégat de produits il s'insère. Nous avons vu en 2-c que la comptabilité nationale agrège souvent aux biens énergétiques d'autres biens et services non-énergétiques.

¹⁹ Balanço Energético Nacional 2005 (EPE, 2006)

²⁰ Nous avons opté dans l'exemple pour une répercussion des autoconsommations dans les coûts de production et donc conservé ces flux dans le bilan.

²¹ Les 6 Mtep de produits pétroliers non-énergétiques ont été retirés du niveau de production de produits pétroliers en sortie de raffinerie. (cf cellule foncée Figure 7)

	Fossiles prim.	Prod. Pétroliers	Electricité
Production	100	0	0
Imports	36	5	3
Exports	-14	-13	0
Centrales élec.	-6	-3	34
Raffineries	-88	74	-1
Auto-cons.	-1	-5	-4
Industrie	27	6	12
Transport	0	42	0
Résidentiel	0	7	9
Autres secteurs	0	3	11

Figure 7 : Bilan énergétique réduit

Viens ensuite le travail sur **les nomenclatures**. En général les biens énergétiques sont suffisamment désagrégés pour qu'il ne soit pas nécessaire de faire des découpages supplémentaires. En revanche, les items en ligne du bilan énergétique ne correspondent pas toujours aux secteurs consommateurs d'énergie que l'on souhaite isoler (ceux du TES que l'on a construit). Pour ne prendre qu'un exemple, il est utile pour analyser la consommation des ménages, de désagréger le secteur *transport* du bilan énergétique initial en un poste *transport public/professionnel* (en tant que secteur productif fournissant du service de transport) et un poste *transport privé* (qui correspond à l'usage d'un véhicule privé par les ménages et une consommation directe de carburant). Il faut pour cela se donner des règles de ventilation entre ces deux nouveaux postes des quantités énergétiques de ce secteur transport initial (42 Mtep). Cette opération est basée sur des données additionnelles concernant les types de flotte de véhicules relatifs à ces deux types de transports (bus vs véhicules privés par exemple) et les statistiques de consommation de carburants associées.

Cela conduit sur cet exemple à transférer 15 Mtep de produits pétroliers au secteur résidentiel pour rassembler la consommation énergétique totale des ménages.

	Fossiles prim.	Prod. Pétroliers	Electricité
Production	100	0	0
Imports	36	5	3
Exports	-14	-13	0
Centrales élec.	-6	-3	34
Raffineries	-88	74	-1
Auto-cons.	-1	-5	-4
Industrie	27	6	12
Transport public / professionnel	0	27	0
Résidentiel + transport privé = ménages	0	22	9
Autres secteurs	0	3	11

Figure 8 : Bilan énergétique intermédiaire avec nomenclatures réarrangées

On procède enfin au réaménagement du bilan énergétique intermédiaire dans la logique entrées-sorties pour obtenir une table input-Output en Mtep²².

	Produits						Usages finaux		Total emplois
	Fossiles Prim.	Prod. Pétroliers	Électricité	Industrie	Transports	Autres secteurs	Conso. Finale	Exports	
Fossiles Prim.	1	88	6	27	0	0	0	14	136
Prod. pétroliers	0	5	3	6	27	3	22	13	79
Electricité	0	1	4	12	0	11	9	0	37

Imports	36	5	3
Production	100	74	34

Figure 9 : Table entrées-sorties en flux énergétiques (Mtep)

c. *Compilation des données de prix et calcul des factures énergétiques*²³

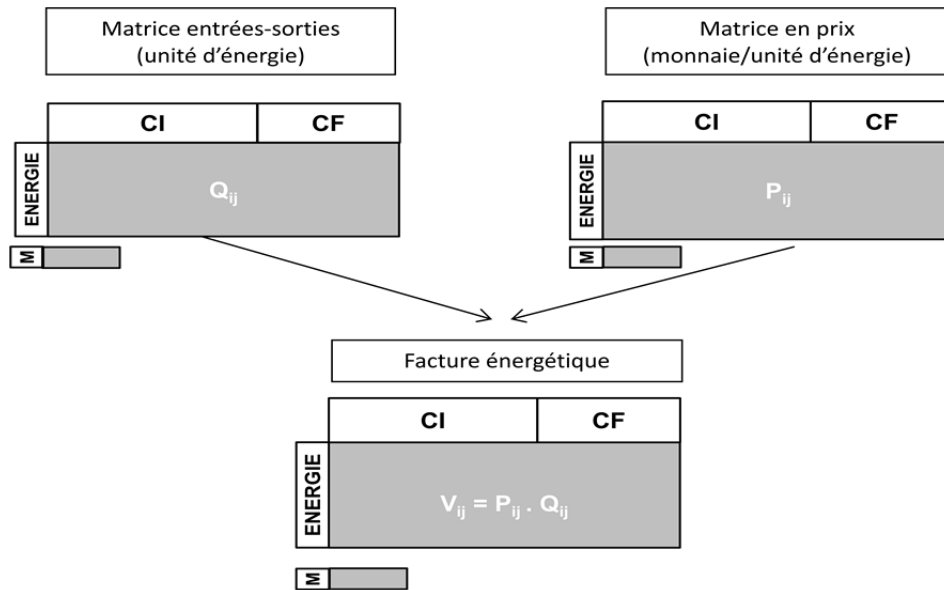
Pour reconstituer les factures énergétiques il reste à effectuer la seconde partie du travail : la **compilation des données sur les prix observés**. L'objectif est d'affecter un prix à chaque cellule de la matrice entrées-sorties énergétique que l'on vient de construire, chaque prix correspondant à un agrégat de transaction sur le marché des biens énergétiques. Pour cette composante prix, notre méthode offre ici la possibilité d'inclure des informations précises sur des différences de tarif en fonction des types de poste de consommation pour un même bien énergétique en mobilisant des données de niveau microéconomique (tarifs exacts à la pompe, contrats tarifaires spécifiques pour certains secteurs consommateurs, etc) grâce à un niveau de désagrégation intermédiaire élevé. Cette détermination des prix se fait sous contrainte de cohérence avec la nomenclature de la comptabilité nationale (valeur au prix de production ou de consommation, taxes, marges incluses, etc).

Une fois obtenu les tableaux entrées-sorties en Mtep et en prix, on procède à une agrégation au format Input-output final. L'agrégation des matrices de prix et de coefficients d'émission repose au niveau de chaque agrégat final sur un calcul de moyenne pondérée par les parts en volume des sous-agrégats correspondants de la matrice entrées-sorties désagrégée intermédiaire. Par exemple le prix du *carburant/produits pétroliers* pour chaque consommateur sera une moyenne sur les prix du *diesel*, de *l'essence*, du *GPL*, etc pondérée par les quantités respectives consommées. Ainsi dans les matrices finales de prix et de coefficients d'émissions, les valeurs agrégées différenciées ont un fondement de niveau micro permis par la liberté d'inclusion de données sectorielles disparates.

²² A noter que dans cette transformation les coefficients négatifs du bilan deviennent positifs pour suivre les règles comptable du TES qui rassemble les montants des consommations par des coefficients positifs (y compris pour les autoconsommations).

²³ C'est également à ce stade qu'il convient de réunir les données sur les facteurs d'émission liés aux consommations énergétiques, dans le but de calibrer un modèle qui effectue la comptabilisation de ces émissions. Le niveau de désagrégation en pratique important permet d'inclure des coefficients proches de la réalité physique et thermodynamique des procédés (transformation, combustion, etc).

La multiplication terme à terme des tables entrées-sorties en Mtep et en prix permet d'obtenir une matrice en valeur correspondant au détail de la facture énergétique de l'économie.



	Produits			Usages finaux		Total emplois
	Prod. pétroliers	Electricité	Composite	Conso. finale	Exports	
Prod. Pétroliers	3	3	98	51	12	167
Electricité	1	14	60	25	0	100
Imports	5	2				

Figure 10 : Schéma de calcul de la facture énergétique - Facture énergétique en valeur monétaire²⁴

d- Incorporation de la facture énergétique dans le TES et ajustements

C'est l'étape clé du processus d'hybridation qui se décline en deux temps. Le temps 1 consiste à incorporer dans le TES la facture énergétique calculée en basculant les écarts avec la facture énergétique initiale du TES vers des biens non-énergétiques. Ceci a pour effet de modifier la valeur économique des biens énergétiques sans changer la taille de l'économie et d'offrir un point d'appui pour la correction des structures de coût et de valeur ajoutée de ces biens qui permet au temps 2 d'ajuster les niveaux des ressources aux niveaux des emplois et de rétablir l'équilibre emplois-ressources.

²⁴ Leur prise en compte n'étant pas essentielle pour la suite des explications, nous avons écartés dans l'exemple numérique les fossiles primaires de la facture énergétique

Temps 1 : L'incorporation de la facture énergétique calculée commence par la comparaison avec la facture énergétique telle qu'elle apparaît dans le TES. Nous avons déjà souligné (2-c) que la nomenclature du TES de la comptabilité nationale agrège aux biens énergétiques que l'on souhaite isoler un certain nombre d'autres biens et services. Incidemment sauf exception les montants des consommations d'énergie en valeur monétaire sont supérieurs dans le TES.

	Produits			Usages finaux		Total emplois
	Prod. pétroliers	Electricité	Composite	Conso. finale	Exports	
Prod. Pétroliers	5	4	110	55	14	188
Electricité	2	32	80	53	0	167
Composite	90	26	1600	2004	310	4030
Valeur ajoutée + marges	81	100	2000			4385
Imports	10	5	240			
Total ressources	188	167	4030	4385		
Equ. Emplois-ressources	0	0	0			

	Produits			Usages finaux		Total emplois
	Prod. pétroliers	Electricité	Composite	Conso. finale	Exports	
Prod. Pétroliers	3	3	98	51	12	167
Electricité	1	14	60	25	0	100
Imports	5	2				

Figure 11 : Comparaison du TES symétrique initial en valeur monétaire avec la facture énergétique calculée

On retrouve dans l'exemple numérique les différentiels de facture énergétique du cas du Brésil en 2005 (2-c)²⁵

Nous basculons alors les différences de facture énergétique, que nous considérons par construction comme n'étant pas directement liées à des flux énergétiques, vers d'autres biens du TES sans changer la « taille » de l'économie. Techniquement, il s'agit de soustraire aux valeurs du TES les factures énergétiques calculées et d'agréger les différences obtenues aux emplois d'un bien similaire (à défaut d'information sur la nature de ces autres biens et services, les différences seront agrégées au bien « composite », qui rassemble les éléments dont la description précise n'est pas essentielle). Cette procédure induit des variations pour les emplois (en lignes) qui rompt temporairement l'équilibre avec les ressources.

²⁵ Emplois total des produits pétroliers : 188 milliards R\$ (Comptabilité nationale) vs 167 milliards R\$ calculés. Emplois total d'électricité : 167 milliards R\$ (Comptabilité nationale) vs 100 milliards R\$ calculés

	Produits			Usages finaux		Total emplois
	Prod. pétroliers	Electricité	Composite	Conso. finale	Exports	
Prod. Pétroliers	3	3	98	51	12	167
Electricité	1	14	60	25	0	100
Composite	93	45	1632	2036	312	4118
Valeur ajoutée + marges	81	100	2000			4385
Imports	5	2	248			
Total ressources	183	164	4038	4385		
Equ. Emplois-ressources	16	64	-80			

Figure 12 : Résultat du temps 1 : modification des emplois²⁶

Temps 2 : Il s’agit de corriger les ressources pour rétablir les équilibres. Etant connues les valeurs des importations et des consommations intermédiaires énergétiques pour la production énergétique elle-même, un ensemble d’hypothèses est nécessaire pour déterminer le reste de la structure de coût de production et la marge d’exploitation (*mark-up*) des biens énergétiques avec la contrainte de rétablir les équilibres emplois-ressources en valeurs (EER) pour ces biens²⁷. Les différences avec les structures de coût du TES courant sont ajoutées aux mêmes biens similaires que pour les opérations en ligne. Cette manipulation assure en même temps que les équilibres emplois-ressources en valeurs (EER) sont simultanément rétablis pour les biens non-énergétiques.

Dans l’exemple numérique, pour les *produits pétroliers* et *l’électricité*, les coûts énergétiques et les importations sont fixées²⁸. Reste alors à déterminer le reliquat des factures en biens et services (ici le montant des consommations de bien composite) ainsi que la valeur ajoutée et les marges (salaires + marge d’exploitation) des productions énergétiques avec la contrainte de rééquilibrer emplois et ressources²⁹. A défaut d’information spécifique on réduit ces postes au prorata des montants courants³⁰. Ceci revient à considérer dans les deux cas que la structure de coût en composite et le taux de valeur ajoutée sont identiques entre le bien énergétique que l’on souhaite isoler et les autres biens et services que l’on veut écarter du circuit énergétique. Toute hypothèse alternative est possible. Pour chaque poste, les reliquats sont finalement ajoutés à la colonne composite³¹ ce qui permet de rétablir l’équilibre emplois-ressources.

²⁶ Ainsi, dans l’exemple numérique, on remplace en premier la facture énergétique pour fixer les emplois en biens énergétiques (167 et 100 au total) et les imports (5 et 2). Les emplois en composite sont ensuite augmentés des différences entre les factures en produits pétroliers et d’électricité initiales et les factures énergétiques calculées ce qui fait passer le total des emplois de bien composite de 4030 à 4118 et permet de maintenir le total des emplois de l’économie à 4385. La même opération est effectuée avec les imports de composite qui passent de 240 à 248.

²⁷ Alternativement, il est possible de formuler ce jeu d’hypothèse pour les autres biens et services que l’on doit extraire du circuit énergétique, s’il s’avère qu’ils sont facilement identifiables et que l’information sur leur production (structure de coûts, marge) est facilement disponible.

²⁸ Exemple de la production électrique : 3+14 pour les coûts énergétiques, 2 pour les imports.

²⁹ Il s’agit numériquement de retirer 16 aux ressources des *carburants* et 64 aux ressources de *l’électricité*

³⁰ Par exemple on répartit la valeur 16 dans la colonne *carburants* en enlevant $16 \cdot 93 / (81 + 93)$ au poste *composite* et $16 \cdot 81 / (81 + 93)$ au poste *valeur ajoutée + marges*.

³¹ Le raisonnement sous-jacent est de considérer que ces valeurs correspondent à des biens et services que l’on veut agréger au composite.

	Produits			Usages finaux		Total emplois
	Prod. pétroliers	Electricité	Composite	Conso. Finale	Exports	
Prod. pétroliers	3	3	98	51	12	167
Electricité	1	14	60	25	0	100
Composite	84	25	1660	2036	312	4118
Valeur ajoutée + marges	74	56	2052			4385
Imports	5	2	248			
Total ressources	167	100	4118	4385		
Equ. Emplois-ressources	0	0	0			

Figure 12 : Résultat du temps 2 : restauration de l'équilibre emplois-ressources

Au-delà de cet exemple pédagogique qui met en œuvre une méthode simple pour corriger la structure de coût des biens énergétiques pour rééquilibrer emplois et ressources, il est possible d'introduire des raffinements spécifiques. Mais il n'existe alors plus de solution systématique. L'hypothèse de séparation des conditions de production des biens – que suppose l'analyse input-output classique – est en effet bien souvent une opération de l'esprit qui ne repose sur aucun sous-jacent tangible. Effectivement l'analyse entrées-sorties suppose que les biens qui sont produits sont séparables alors qu'en pratique il y existe de très nombreux coproduits.

On peut tout de même proposer un arbre de choix pour sélectionner le jeu d'hypothèses à retenir pour une analyse fine (Figure 6). Comme pour les autres étapes du procédé d'hybridation, on cherche à mobiliser le maximum d'informations microéconomiques, mais à défaut on se contente d'une règle simple. Si les productions que l'on souhaite désagrèger (P1 et P2) sont produites par des unités productives distinctes, le niveau de dépendance est faible, il est alors probable que l'information sur les coûts de production de l'une ou l'autre soit disponible. Si au contraire ces unités sont en majorité les mêmes, mais que les portefeuilles de procédés sont distincts, une information sur les coefficients techniques (quantités d'input, de capital, de travail) peut *a priori* être utilisée pour distinguer les coûts. Dans le cas restant (unité et procédés semblables), l'hypothèse de structure de coûts identique est justifiée. Enfin, la contrainte d'équilibre (EER) donne une règle de partage pour ce qui reste d'inconnu (certains coûts et la marge, ou la marge uniquement).

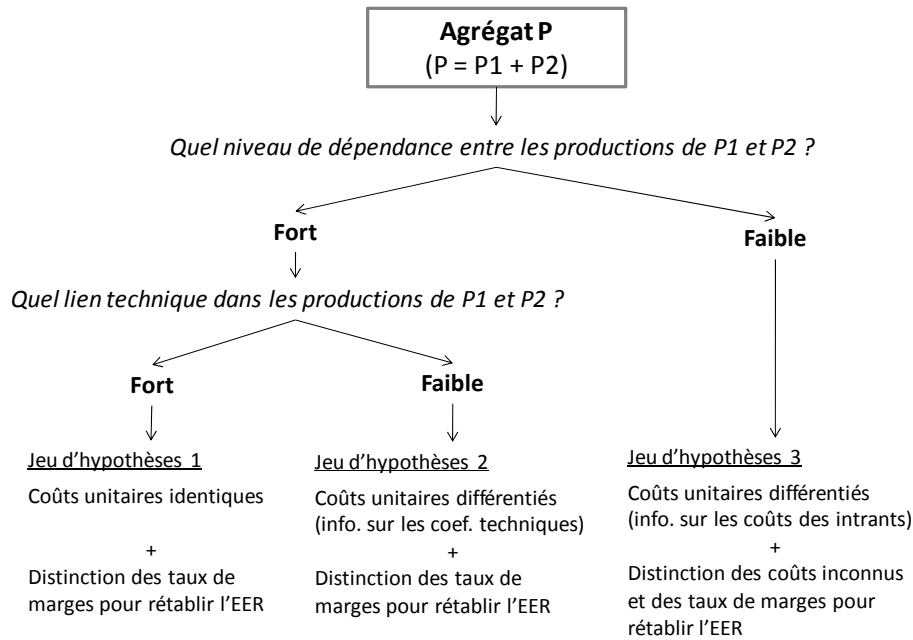


Figure 13: Arbre de choix pour reconstituer la formation des coûts et calculer les marges

Il faut aussi remarquer que ce procédé permet de modéliser une différenciation des tarifs d'achat selon le type d'acheteur (coût moyen du m³ de gaz vendu aux industriels, agriculteurs, particuliers, etc.) en désagrégant la marge d'exploitation faite sur les volumes agrégés, en « marges spécifiques différenciées ». Cette potentialité est importante pour décrire les marchés d'énergies, où la diversité des forfaits, abonnements, en fonction des services, de la fréquence et des volumes d'approvisionnement, joue probablement un rôle sur l'incidence d'un prix du carbone. Cela constitue une autre avancée par rapport aux techniques d'hybridation existantes qui supposent un prix de production (avant impôts) homogène (cf. 2-d)

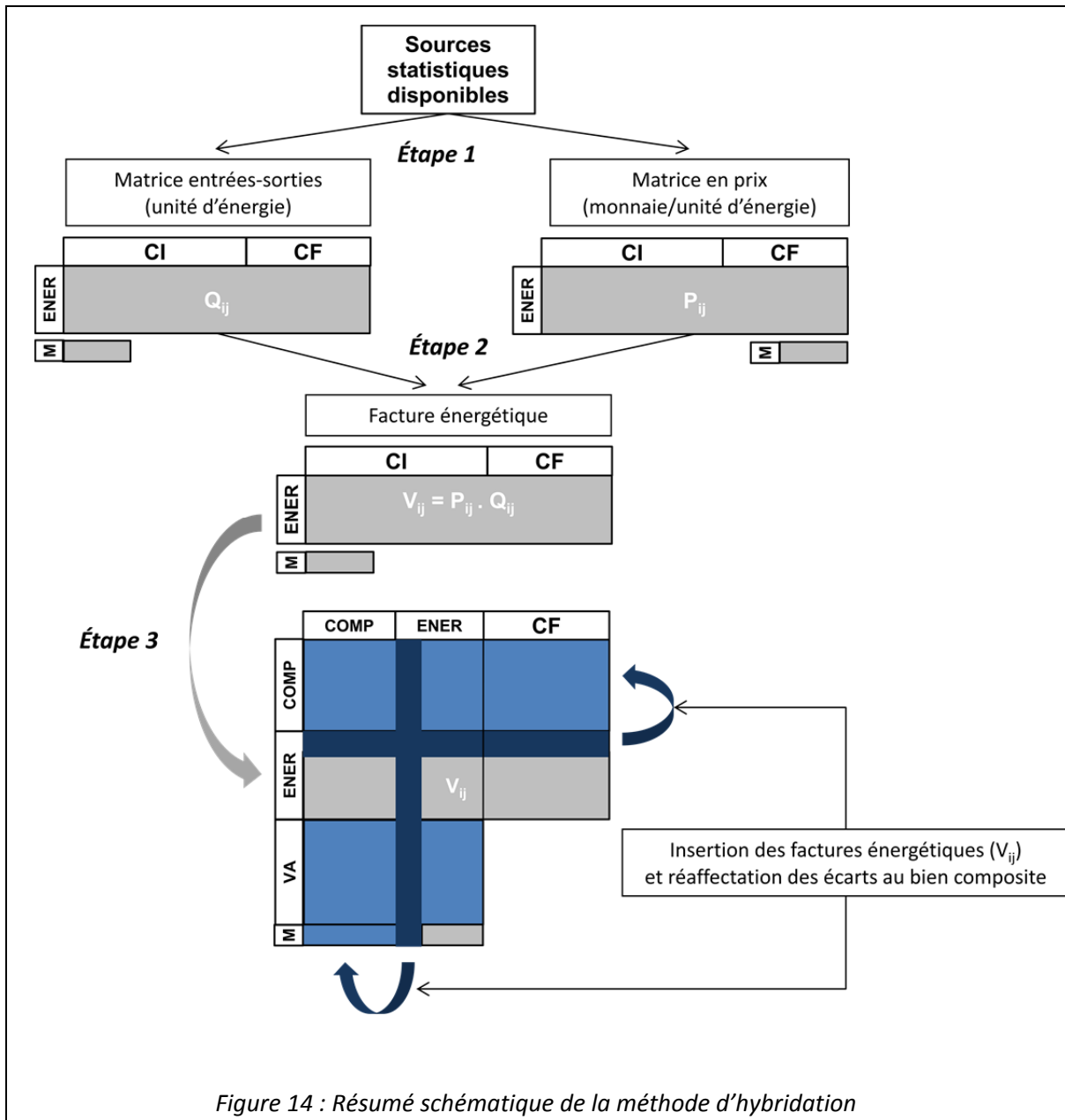


Figure 14 : Résumé schématique de la méthode d'hybridation

Conclusion :

La description précise d'un protocole systématique et l'illustration numérique dans le cas du Brésil (matrice hybride intégrale en annexe) montrent les potentialités et marges de manœuvre qu'apporte cette procédure d'hybridation des données qui permet d'assurer les exigences de cohérence fondamentales quantité-valeur en confrontant point de vue de l'ingénieur et du comptable national.

Son point fort essentiel tient à la délimitation précise du circuit énergétique et matériel qu'elle opère au sein du système économique basée sur les flux physiques et des données sur les prix qui laisse la possibilité d'isoler des circuits économiques particuliers qui comptent pour l'analyse des politiques climatiques. Le dialogue ingénieur-comptable national s'effectue via la grande liberté d'inclusion de données sectorielles disparates pour construire le schéma entrées-sorties hybride.

En particulier, cette méthode garantit à la fois la possibilité de désagréger les secteurs à volonté en fonction de leur nature physique mais elle permet aussi une grande flexibilité dans la description du rôle de ces agrégats matériels dans la sphère « monétaire ». En effet nous avons montré comme on pouvait imposer des différences de tarifs et des spécificités de la structure de coût des agrégats concernant les facteurs de production (inputs, travail, capital), les taxes, les marges spécifiques en relation avec ces tarifs.

Au total il en ressort un contrôle des circuits de matière à l'échelle macroéconomique, fondé sur la compréhension et la maîtrise des flux à une échelle méso voire microéconomique pour une plus grande robustesse de l'analyse économique des politiques qui impactent spécifiquement ces circuits (taxe carbone sur les carburants fossiles par exemple, (Gherzi, 2009)).

Par ailleurs, l'exemple pratique qui a été présenté sur le secteur énergétique pourrait être étendu à d'autres types de flux de matière comme les pondéreux (acier, ciment, papier, etc) ou les commodités agricoles. Cette procédure peut également concerner d'autres types d'indicateurs comme les surfaces ou les distances pour l'analyse spatiale (économie urbaine, modèles de *land-use*).

Enfin, cette méthode d'hybridation est et sera mise en place dans le cadre du développement de l'architecture de modélisation Imaclim-S appliquée à de nouveaux contextes nationaux (Brésil, Chine, Afrique du Sud, etc) mais intervient également dans le cadre des programmes de couplage dont celui entre le modèle TIAM et Imaclim-S.

Références :

Arrow K.J. et Debreu G., 1954. "Existence of an Equilibrium for a Competitive Economy". *Econometrica*.

Babiker, M.H.M. and Reilly, J.M. and Mayer, M. and Eckaus, R.S. and Sue Wing, I. and Hyman, R.C., 2001. "The MIT emissions prediction and policy analysis (EPPA) model: revisions, sensitivities, and comparisons of results". *MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change*.

Böhringer, C., Rutherford, T. F., 2008, "Combining bottom-up and top-down", *Energy Economics*, 30, 547-596

Brunelle T., Souty F. , Dorin B. , Le Cotty T., Dumas P., Ciais P. : « A New Land Use Modelling Architecture: The Nexus Land Use ». Communication pour conférence internationale des économistes de l'énergie l'IAEE (6-9juin 2010), Montreal.

Burniaux J. M., Martin, J. P., Nicoletti, G., Oliveira Martins, J., 1991, "GREEN - A Multi-Region Dynamic General Equilibrium Model for Quantifying the Costs of Curbing CO2 Emissions: A Technical Manual", OECD Economics Department Working Papers 104, OECD Economics Department.

Capros, P. and Mantzos, L. and Kolokotsas, D. and Ioannou, N. and Georgakopoulos, T. and Filippopoulitis, A. and Antoniou, Y.}, 1998 The PRIMES energy system model--reference manual National Technical University of Athens, Document as Peer Reviewed by the European Commission, Directorate General for Research

Crassous R., 2008. « Modéliser le long terme dans un monde de second rang: Application aux politiques climatiques ». *Thèse de doctorat*.

Dorin B., Le Cotty T.. 2010. In : Paillard Sandrine (ed.), Treyer Sébastien (ed.), Dorin Bruno (ed.). *Agrimonde. Scénarios et défis pour nourrir le monde en 2050*. Versailles : Ed. Quae, p. 25-54.

Eggleston, S. and Buendia, L. and Miwa, K. and Ngara, T. and Tanabe, K, 2006. "IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories". *Institute for Global Environmental Strategies, Hayama, Japan*.

Eurostat Manual of Supply, Use and Input-Output Tables , 2008.

Fawcett, A.A. and Sands, R.D., 2005. "The Second Generation Model: Model Description and Theory". *Pacific Northwest National Laboratory, PNNL-15432*.

Fishbone, L.G. and Abilock, H., 1981. "Markal, a linear-programming model for energy systems analysis: Technical description of the bnl version". *International journal of Energy research*.

Gherzi F., Hourcade J.C., Combet E., 2009. "Taxe carbone, une mesure socialement régressive ? Vrais problèmes et faux débats". WP CIRED.

Grubb, M. and Edmonds, J. and Ten Brink, P. and Morrison, M., 1993. The costs of limiting fossil-fuel CO2 emissions: a survey and analysis, Annual Review of Energy and the environment.

Haurie, A. and Kanudia, A. and Loulou, R. and M. Labriet and L. Drouet and M. Vielle, 2010. "Coupled Bottom-Up and Top-Down Modelling to Investigate Cooperative Climate Policies".

Hourcade, J.C., Jaccard, M., Bataille, C., Gherzi, F., 2006, "Introduction to the Special Issue of the energy journal", *The Energy Journal*, Special Issue: *Hybrid modelling of energy environment policies: reconciling bottom-up and top-down*

Lee, H. and Oliveira-Martins, J. and Van der Mensbrugghe, D. and Organisation for Economic Co-operation and Development, 1994. "The OECD Green model: an updated overview" *Organisation for Economic Co-operation and Development*.

McDougall, R. and Lee, H.L.}, 2006. "An energy data base for GTAP". *Global Trade, Assistance and Production: The GTAP 6 Data Base*.

McFarland, J.R., J.M. Reilly, and H.J. Herzog (2004). "Representing Energy Technologies in Top-Down Economic Models Using Bottom-Up Information". *Energy Economics* 26(4): 685-707.

Rutherford, T.F, and S. Paltsev, 2000: GTAP-Energy in GAMS: The Dataset and Static Model. Discussion Papers in Economics, Working Paper 00-2, University of Colorado.

Sergey Paltsev, John M. Reilly, Henry D. Jacoby, Richard S. Eckaus, James McFarland, Marcus Sarofim, Malcolm Asadoorian and Mustafa Babiker, 2005. The MIT Emissions Prediction and Policy Analysis (EPPA) Model: Version 4

Sands, R.D. and Miller, S. and Kim, M.K, 2005. "The second generation model: Comparison of SGM and GTAP approaches to data development". *PNNL report*, volume: 15467.

Sassi, O. and Crassous, R. and Hourcade, J.C. and Gitz, V. and Waisman, H. and Guivarch, C., 2010. "Imaclim-R: a modelling framework to simulate sustainable development pathways". *International Journal of Global Environmental Issues* 10(1): 5-24.

Schrattenholzer L., 1994. "The energy supply model MESSAGE". *IIASA*.

Solow, R.M. , 1988. "Growth Theory and After." *American Economic Review* 78(3): 307-317.

Annexes : Construction d'un tableau entrées-sorties *hybride* à 18 secteurs pour le Brésil en 2005

Principales données sources :

- Balanço Energético National 2005 (EPE, *Empresa de Pesquisa Energética*)
- Sistema de Contas Nacionais 2005 (IBGE, *Instituto Brasileiro de Geographia e Estatistica*)
- Agencia National Petroléo (ANP)

	CI																	CF				Total	P	M	
	Biomasse	Charbon	Pétrole brut	Gaz	Pétro. / Ethan.	Electricité	Construction	Transport	Pâtures	Reste agri.	Papier	Ciment	Acier	Non-ferreux	Chimie	Extrac. minière	Reste de l'industrie	Composite	C	G	I	X			
Biomasse	12365	0	0	0	16483	3726	0	0	306	16741	5087	719	5466	8	163	0	2317	140	8752	0	0	10	72283	72 225	58
Charbon	0	375	0	0	0	1890	0	0	0	62	58	48	10126	264	116	695	179	0	0	0	0	0	13814	2 387	11 427
Pétrole brut	0	0	0	0	87699	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14137	101836	84 186	17 650
Gaz	0	0	5132	242	3731	4022	0	1540	0	515	519	17	1115	490	2159	270	2142	282	362	0	0	0	22539	15 539	7 000
Dériv. pétroliers + éthanol	0	0	158	0	4944	2861	1346	34449	672	4863	749	1940	844	1678	2916	1116	1620	1065	20580	0	0	13974	95775	90 306	5 469
Electricité	0	14	346	0	500	6047	211	102	107	3018	1270	345	2063	2999	1814	829	3775	7415	7155	0	0	14	38024	34 653	3 371
Construction	5	0	1196	108	98	33	3623	65	0	109	33	15	26	17	257	2	1086	19248	0	0	140320	917	167157	166972	185
Transport	435	36	7236	653	2044	1377	1107	15403	143	15852	1174	283	4799	318	8083	5473	23459	57962	70222	0	0	6075	222133	218497	3636
Pâtures	208	0	0	0	0	0	0	0	168	9646	0	0	0	0	0	0	87	114	301	0	3813	77	14413	14399	14
Reste de l'agriculture	2652	0	0	0	283	4	91	155	6942	121553	2834	0	0	1	2646	88	8037	35052	189465	0	3198	57787	430789	419071	11719
Papier	38	2	1	0	24	22	79	84	2	1142	3355	92	8	13	1136	112	4127	3161	3045	0	0	3424	19867	18724	1143
Ciment	1	0	1587	143	26	0	26254	0	0	0	0	1183	15	5	56	37	6565	234	2459	0	0	406	38970	38705	265
Acier	5	1	67	6	2	0	2093	0	0	65	6	84	4386	354	322	115	18227	30	0	0	0	9389	35153	33011	2142
Non-ferreux	1	1	42	4	1	39	155	4	0	21	35	8	467	446	47	26	2539	154	0	0	0	1892	5881	4950	930
Chimie	1324	27	930	84	979	1023	8494	3814	1420	29166	3663	71	1586	1668	60206	1381	39163	26997	57190	0	0	16018	255205	210044	45161
Extrac. minière	83	26	0	0	75	0	2065	0	450	1067	81	108	6616	2632	5229	3120	3083	102	335	0	0	17461	42533	37594	4939
Reste de l'industrie	416	13	5942	536	1583	2371	28749	7381	148	8065	2296	503	6374	1695	20999	2928	141093	53789	162865	0	136737	81884	666367	571268	95099
Composite	647	28	16072	1450	7704	19888	6142	23690	499	17035	1325	431	4983	2083	24198	4362	55607	388785	847266	322771	5656	34917	1785539	1738809	46729

Annexe 1 : Tableau entrées-sorties en volumes (ktep pour les flux énergétiques en rouge, « pseudo-quantités » pour les autres secteurs)

1

2

	CI																		CF				M
	Biomasse	Charbon	Pétrole brut	Gaz	Péto. / Ethanol	Electricité	Construction	Transport	Pâtures	Reste agri.	Papier	Ciment	Acier	Non-ferreux	Chimie	Extrac. minière	Reste de l'industrie	Composite	C	G	I	X	
Biomasse	0.12	0.00	0.00	0.00	0.30	0.05	0.00	0.00	0.25	0.25	0.13	0.22	0.50	0.51	0.16	0.00	0.12	0.30	0.13	0.00	0.00	0.51	0.51
Charbon	0.00	0.28	0.00	0.00	0.00	0.22	0.00	0.00	0.22	0.22	0.22	0.28	0.29	0.29	0.24	0.29	0.24	0.00	0.00	0.00	0.29	0.29	
Pétrole brut	0.00	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.71	0.84
Gaz	0.00	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	1.29	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.80	0.37	0.37	0.37	0.37
Dériv. pétroliers + éthanol	0.00	0.00	1.99	0.00	0.59	0.86	1.99	2.13	1.59	1.59	0.92	0.50	0.75	0.67	0.61	0.94	0.95	1.81	2.57	1.89	0.00	0.97	0.92
Electricité	0.00	2.27	2.27	2.27	2.27	2.27	2.27	2.27	2.27	2.27	2.27	2.27	2.27	0.44	2.27	2.27	2.27	3.57	3.57	3.57	2.27	0.81	
Construction	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.00
Transport	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	1.00
Pâtures	2.11	2.11	2.11	2.11	2.11	2.11	2.11	2.11	2.11	2.11	2.11	2.11	2.11	2.11	2.11	2.11	2.11	2.11	2.11	2.11	2.11	2.11	1.87
Reste de l'agriculture	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29	1.00
Papier	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	1.98
Ciment	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.22
Acier	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	1.46
Non-ferreux	4.95	4.95	4.95	4.95	4.95	4.95	4.95	4.95	4.95	4.95	4.95	4.95	4.95	4.95	4.95	4.95	4.95	4.95	4.95	4.95	4.95	4.95	4.88
Chimie	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.00
Extrac. minière	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.00
Reste de l'industrie	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.00
Composite	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	1.00

3

4

Annexe 2 : Tableau entrées-sorties en prix à la consommation (en M\$R2005/ktep pour les biens énergétiques)

	CI																	CF				Total		
	Biomasse	Charbon	Pétrole brut	Gaz	Péto./ Ethan.	Electricité	Construction	Transport	Pâtures	Reste agri.	Papier	Ciment	Acier	Non-ferreux	Chimie	Extrac. minière	Reste de l'industrie	Composite	C	G	I		X	
CI	Biomasse	1451	0	0	0	4920	201	0	0	78	4264	645	157	2744	4	26	0	285	42	1170	0	0	5	15994
	Charbon	0	107	0	0	0	414	0	0	14	13	13	2917	76	28	200	43	0	0	0	0	0	0	3824
	Pétrole brut	0	0	0	0	64923	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10087	75010
	Gaz	0	0	1896	90	1379	1486	0	1983	0	190	192	6	412	181	798	100	792	104	291	0	0	0	9900
	Péto./ Ethan.	0	0	315	0	2923	2459	2683	73479	1068	7723	688	967	633	1128	1767	1045	1534	1932	52825	0	0	13543	166712
	Electricité	0	32	784	0	1135	13718	479	232	243	6847	2882	782	4679	1308	4115	1880	8562	26474	25544	0	0	31	99726
	Construction	5	0	1233	111	101	34	3736	67	0	112	34	15	27	18	265	3	1120	19850	0	0	144709	946	172385
	Transport	391	32	6498	586	1836	1237	994	13832	129	14234	1054	254	4309	285	7258	4915	21065	52048	63057	0	0	5455	199469
	Pâtures	438	0	0	0	0	0	0	0	354	20316	0	0	0	0	0	183	240	633	633	0	8031	163	30358
	Reste de l'agriculture	3430	0	0	0	366	5	118	201	8980	157239	3666	0	0	2	3423	114	10397	45343	245089	0	4137	74752	557263
	Papier	90	4	3	0	58	53	189	201	4	2735	8039	221	18	32	2721	269	9887	7575	7295	0	0	8204	47600
	Ciment	0	0	403	36	7	0	6662	0	0	0	0	300	4	1	14	9	1666	59	624	0	0	103	9888
	Acier	12	1	158	14	5	0	4945	0	0	154	14	199	10365	837	762	272	43069	72	0	0	0	22185	83064
	Non-ferreux	5	3	209	19	5	195	765	18	0	106	175	40	2315	2208	230	127	12575	761	0	0	0	9373	29129
	Chimie	1690	34	1187	107	1250	1306	10844	4869	1813	37235	4677	91	2025	2129	76864	1764	49998	34466	73013	0	0	20450	325813
	Extrac. minière	98	31	0	0	89	0	2435	0	531	1258	95	128	7803	3105	6168	3681	3637	120	395	0	0	20596	50170
	Reste de l'industrie	549	17	7837	707	2088	3127	37918	9735	195	10637	3028	663	8407	2236	27696	3861	186093	70944	214808	0	180347	108000	878892
Composite	573	24	14245	1286	6829	17627	5444	20997	442	15099	1174	382	4417	1846	21447	3866	49286	344592	750957	286082	5013	30948	1582577	
VA	Salaires	1270	52	3847	347	2366	7094	22649	32825	5773	48401	4033	473	4132	1833	19622	2487	72702	450143					4337774
	Contrib. soc. officielles	363	13	1501	135	865	1681	5524	6898	1536	13481	1247	155	1554	580	6280	831	19680	73247					
	Contrib. sociales privées	11	1	557	50	238	154	146	23	0	270	61	6	198	40	480	73	819	2132					
	Contrib. sociales imputées	1	0	1	0	0	148	27	241	0	38	5	0	2	1	19	2	203	37976					
	Revenu mixte brut	918	8	0	0	55	0	20923	17336	6375	42429	44	0	6	15	487	262	13053	98881					
	EBE	1057	86	19024	2213	9707	15881	39726	34718	-765	34101	4968	1454	13301	4302	27765	11534	59699	460076					
	Taxes à la production	84	4	278	25	474	616	771	1464	168	2930	343	52	537	175	1814	301	5226	12558					
Subv. à la production	-16	0	0	0	0	-20	-5	-623	-1	-744	0	0	0	0	-5	-1	-306	-824						
M	Imports	30	3292	14886	2587	5022	2731	185	3636	27	11719	2263	59	3122	4544	45161	4939	95099	46729					
Marges et taxes	Marges Commerciales	2157	0	0	0	32356	0	0	0	917	77216	3305	2079	3479	702	42627	2636	118625	-286099					
	Marges de Transport	202	62	51	5	2404	0	0	-33638	10	7677	904	290	1750	583	3129	3193	13376	2					
	Marges Spécifiques	0	0	0	816	0	18968	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
	Taxes imports	34	0	0	0	3	0	0	0	0	329	72	1	217	88	2313	9	5807	0					
	IPI	147	0	0	0	0	0	0	0	0	5752	186	103	1760	33	1985	0	14043	0					
	ICMS	685	0	0	755	10436	12802	0	4721	1620	24349	2240	799	0	47	13830	770	42005	38083					
	Autres taxes et subv.	318	21	96	9	14871	3305	5228	6253	861	11149	1553	198	1931	791	6725	1029	18668	45052					
Total	15994	3824	75010	9900	166712	99726	172385	199469	30358	557263	47600	9888	83064	29129	325813	50170	878892	1582577	4337774					

5

6

Annexe 3 : Tableau entrées-sorties hybride final en valeur (M\$R2005)



Les Cahiers de la Chaire

Chaire Modélisation prospective au service du développement durable

Contact

Nadia MAÏZI

Directrice du Centre de Mathématiques Appliquées (CMA)

MINES ParisTech / CMA
Rue Claude Daunesse
BP 207
06904 Sophia Antipolis

Tel: +33(0)4 97 15 70 79 / Fax: +33(0)4 97 15 70 66
Courriel: nadia.maizi@mines-paristech.fr

Jean-Charles HOURCADE

**Directeur du Centre International de Recherche sur
l'Environnement et le Développement (CIRED)**

CIRED
Campus du Jardin Tropical
45 avenue de la Belle Gabrielle
94736 Nogent sur Marne Cedex

Tel: +33(0)1 43 94 73 63 / Fax: +33(0)1 43 94 73 70
Courriel: hourcade@centre-cired.fr

Site Web: <http://www.modelisation-prospective.org>

Contact de la Chaire: contact@mail.modelisation-prospective.org