

Émissions de CO₂ contre empreinte carbone : quelles conséquences en termes de politiques énergétiques ?

Aurélien Havel et Laura Barbier

Avec la délocalisation des industries, les émissions de gaz à effet de serre (GES) et notamment de CO₂ ont été transférées des pays riches vers les économies manufacturières. Cette internationalisation annihile les effets des législations environnementales contraignantes mises en place dans les pays développés. Si une entreprise souhaite polluer, elle délocalisera sa production vers des régions du monde où les contraintes environnementales sont moins fortes, voire inexistantes. Avec la multiplication des réglementations visant à limiter les émissions, la question de leur redistribution entre producteur et consommateur est aujourd'hui au centre des débats. Un sujet de forte actualité en prévision de la COP21 de décembre prochain.

Entre 1970 et 2010, les exportations de biens et de services ont été multipliées par 49. Ce développement est bien plus rapide que le développement du PIB mondial, de la population ou des émissions de CO₂ (Fig. 1). L'influence de la libéralisation des échanges sur l'environnement a été étudiée par Grossman & Krueger [1] et a permis d'identifier trois effets majeurs :

- Effet « de composition » : la spécialisation de chaque pays dans les domaines où il dispose d'avantages comparatifs implique une meilleure utilisation des ressources humaines et naturelles.
- Effet « d'échelle » : le libre échange permet un accroissement de la production, ce qui, sur le plan environnemental, se traduit par un effet négatif.
- Effet « technique » : la libéralisation permet une transmission des techniques les plus

avancées et les moins polluantes à l'échelle planétaire.

L'impact environnemental de la mondialisation n'est donc pas aisément lisible du fait de la conjugaison de ces trois effets.

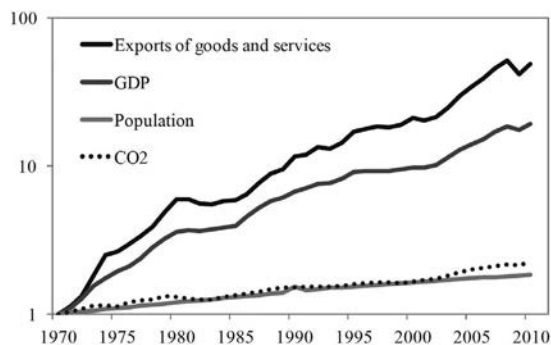


Figure 1. Croissance mondiale des exportations de biens et services, du PIB, de la population et des émissions de CO₂ de 1970 à 2010 / (1970 = 1) [2]

1. La problématique de la responsabilité : producteurs contre consommateurs

Un inventaire des émissions de GES sert à comptabiliser l'impact d'un pays, d'un système ou d'un processus générique sur son environnement. Mais, si l'on considère un pays qui n'importe que des produits transformés, on peut observer une situation paradoxale conjuguant un haut niveau de vie avec un niveau d'émission de GES très faible. *A contrario*, un pays qui produit des biens pour d'autres régions du monde devra « payer » pour le CO₂ associé. La situation est encore plus avérée si l'on prend en considération le transport : un pays traversé par des camions paiera les émissions de GES associées à des biens qu'il n'a pas produits et qu'il n'utilisera pas [3].

L'empreinte écologique, concept proposé par Weckernagel et Rees en 1996, prône que chaque activité économique a un impact sur la planète. L'impact écologique correspond au montant de biens naturels détruits, consommés ou occupés. Le consommateur d'un produit fini est responsable de l'impact écologique du processus qui l'a généré. Il est donc plus juste de lui attribuer les émissions associées. Cependant, cette décharge de responsabilité des producteurs ne les inciterait pas à se diriger vers des modes de productions plus propres et plus efficaces.

Une autre alternative, moins radicale, serait une méthode calculant l'énergie grise reposant sur la théorie d'Odum [4]. Un processus peut être divisé en plusieurs étapes et, pour chacune d'entre-elles, un producteur et un consommateur sont définis. Dans ce cas, on peut considérer que chaque consommateur est responsable des émissions relatives à l'étape correspondante et sera coresponsable des émissions générées par les fournisseurs de biens et services. Ainsi, les consommateurs sont encouragés à trouver les producteurs ayant les meilleures performances environnementales et les producteurs sont incités à réduire leurs émissions.

2. Quatre méthodes de comptabilisation préconisées

L'organisation indépendante *Carbon Trust* présente dans son rapport "*The carbon emissions generated in all that we consume*" [5] un ensemble de propositions de comptabilité d'émission de CO₂. Chaque nouvelle méthode se construit sur les résultats de la précédente dans le but de passer d'une comptabilisation sous l'angle de la production à une comptabilisation sous l'angle de la consommation. Les quatre modèles formulés sont les suivants :

A) Comptabilité basée sur la production

Ce mode de comptabilité est le plus conventionnel. En l'appliquant au Royaume-Uni, les trois secteurs les plus polluants sont : le secteur de production électrique (24 millions de tonnes de carbone par an ou MtC), les transports terrestres (7,9 MtC) et les industries de raffinage (7,2 MtC).

B) Comptabilité basée sur la consommation

Ce mode de comptabilité alloue à chaque produit et service tout le CO₂ induit directement ou indirectement au niveau du pays consommateur et à l'étranger, en se basant sur la demande finale. Les émissions des secteurs tels que la production d'électricité, d'acier ou de fer sont alors réallouées sur la chaîne de distribution. Dès lors, le secteur le plus émetteur devient la construction (10,8 MtC) du fait de l'empreinte carbone importante de tous les matériaux utilisés. La grande distribution se place en deuxième position (6,7 MtC), juste devant les hôtels et autres services (5,7 MtC). L'empreinte carbone de ces catégories de services s'explique par les infrastructures importantes et leurs besoins en chauffage et électricité.

C) Comptabilité basée sur la consommation avec réaffectation des capitaux fixes

Pour ce mode de comptabilité, la consommation globale donnée dans le modèle précédent est divisée en trois groupes distincts :

- dépenses privées (consommation des ménages),

- dépenses publiques (services publics, etc.),
- investissements sous forme de capital fixe.

Le capital fixe est requis pour soutenir les activités de consommations courantes et futures des deux premiers groupes (rénovations d'immeubles, d'usines ou d'autres actifs immobilisés). Ainsi, cet investissement est un outil pour la création de produits et services délivrés au consommateur. Les émissions de CO₂ qui en découlent peuvent être réaffectées aux étapes de la chaîne d'approvisionnement de la catégorie de produits et services qu'ils soutiennent, reflétant l'impact du capital fixe sur la chaîne d'approvisionnement des produits et services finals. Les émissions du secteur de la construction sont ainsi ré-imputées. Les pollueurs les plus importants sont, dans ce cas, la grande distribution (10,3 MtC), les hôtels et autres services (8,3 MtC) et la distribution en gros (6,9 MtC).

D) Comptabilité basée sur la consommation avec réaffectation des capitaux fixes et de la distribution

Le mode de comptabilité précédent met en avant des secteurs de la distribution. Leurs émissions sont notamment dues aux infrastructures, à l'électricité et aux combustibles consommés. Or, ces secteurs délivrent le bien ou le service au consommateur final : il est donc logique de réaffecter les émissions carbone aux services et produits associés. Les trois secteurs les plus polluants sont alors les lieux de service comme les hôtels (8,3 MtC), la production de moteurs de véhicules (7,1 MtC) et les services de santé (6,1 MtC).

L'approche basée sur la consommation dans le but d'analyser les émissions de CO₂ fournit une nouvelle et puissante perspective pour les politiques existantes sur la gestion des émissions de CO₂. Cependant, il est difficile de définir le niveau de réallocation optimal et les lobbies sectoriels joueront un rôle majeur dans les négociations.

Si la comptabilité environnementale, basée sur la consommation des pays, se met en place à l'échelle internationale, nous assisterons à un retournement de situation pour les pays développés (Fig. 2). Les pays engagés dans des

actions environnementales fortes (par exemple, les signataires du protocole de Kyoto) verront alors leur bilan se noircir, remettant en cause l'utilité de ces différentes politiques.

3. Quelle comptabilité internationale des émissions de CO₂ ?

La répartition juste des émissions est une étape essentielle pour établir des politiques de réduction de GES efficaces et mettre en place des outils économiques de régulation des émissions à l'échelle mondiale, comme l'ambitionne l'accord de la COP21 (taxes, marchés...). Mais l'établissement d'une comptabilité internationale se heurte à de nombreux freins, en particulier la disponibilité des données pour un grand nombre de pays et l'harmonisation de celles-ci. Par ailleurs, la mondialisation a augmenté les échanges entre les industries. Pour éviter tout doublon dans la comptabilité, il est donc essentiel de prendre en compte les émissions directes et indirectes relatives à un bien sur l'ensemble du cycle de vie du produit.

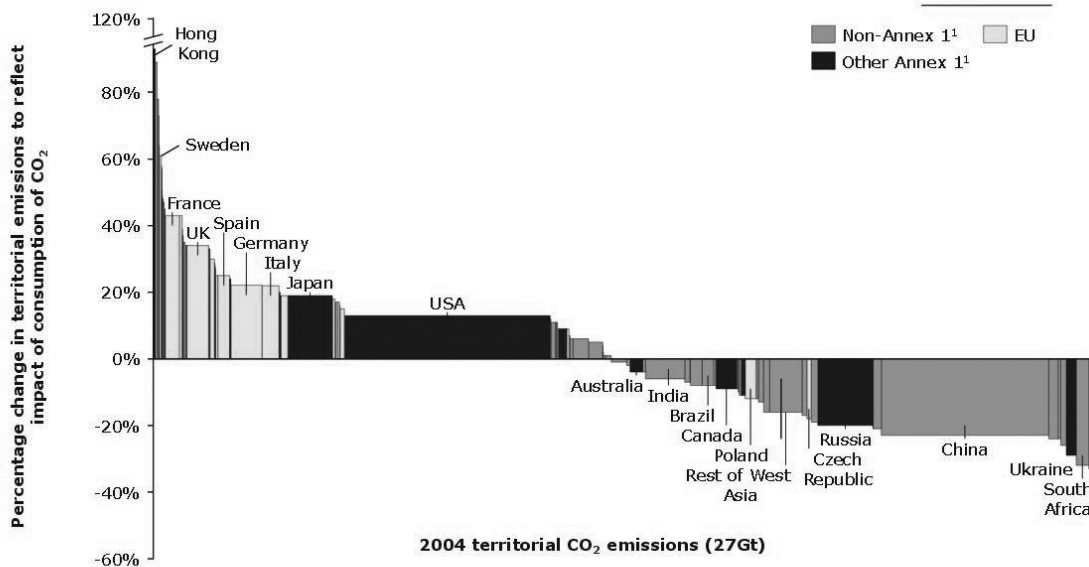
La première clé dans l'établissement d'un mode de comptabilité consiste à définir le niveau d'agrégation :

- Échelle macroscopique : seule la balance des émissions d'un pays sera considérée.
- Échelle mésoscopique : elle établit l'implication des secteurs d'activités d'un pays dans le bilan carbone.
- Échelle microscopique : elle quantifie les émissions sur des systèmes très désagrégés pouvant aller jusqu'au produit, aux ménages ou à une industrie.

Comme analysé par Wiedmann *et al.* [7], ces niveaux d'agrégation ont des portées nécessairement différentes sur les plans politique et économique (Fig. 3). Le choix de la méthode découle donc directement de l'objectif politique recherché. Actuellement, il n'existe aucune méthode capable de couvrir l'ensemble des niveaux d'agrégation.

En termes d'impact environnemental et d'élaboration de politiques économiques, la prise en compte des échanges internationaux oblige à un certain niveau d'agrégation. Ainsi, depuis le début des années 2000, l'utilisation

A consumption perspective alters the distribution of emissions between countries



1. Annex 1 to UNFCCC

Note 1: Includes CO₂ emissions from production, process, transport and household sources only (27Gt in 2004); excludes non-CO₂ emissions, and emissions due to land-use-change

Note 2: Based on an MRIO (multi region input/output) model allocating emissions to regions of consumption

Source: Carbon Trust Analysis; CICERO / SEI / CMU GTAP7 MRIO Model (2004)

Figure 2. Émissions territoriales de CO₂ en 2004 et pourcentage de modification des émissions territoriales lors du passage d'une comptabilité « producteur » à une comptabilité « consommateur » [6]

de modèles *input-output* pour mesurer la valeur et les émissions des biens et services commercialisés est devenue un sujet de recherche majeur. L'analyse *input-output* (IO) est une technique de type *top-down* pour attribuer la pollution ou les ressources destinées à une demande finale dans un cadre défini.

De manière simplifiée, l'analyse IO est un système d'équations linéaires distribuant la production d'une industrie à travers l'ensemble de l'économie [8]. Ces modèles permettent de réallouer les émissions aux biens et services d'une économie en tenant compte de leurs sources et des lieux de consommation. À l'échelle mondiale, la difficulté de réalisation d'un système *input-output* est décuplée puisqu'il est non seulement nécessaire de calculer les impacts de la production globale et des productions nationales, mais aussi de comprendre comment le commerce des biens

et services s'organise à l'international. Deux approches théoriques se sont dégagées dans la littérature pour traiter un système à l'échelle mondiale :

- La méthode EEBT (*Emissions Embodied in Bilateral Trade*), aussi dénommée BTIO (*Bilateral Trade Input-Output*), considère les émissions associées à la consommation totale d'un pays en décomposant par partenaire commercial et en appliquant des facteurs d'émission différenciés.
- La méthode MRIO (*Multi-Regional Input Output*) est utilisée pour mesurer les émissions en se concentrant sur les biens consommés plutôt que sur les flux (*Consumption Based Emissions* ou CBE). Il est important de noter que le modèle MRIO distingue les importations destinées à la consommation directe de celles réservées à la consommation intermédiaire, contrairement à la méthode EEBT.

Echelle	Méthodes	Approche analytique	Approche analytique	Focus politique	Types de politiques	Instruments politiques	Exemples de politiques
Macroscopique	CGE	Processus Top-Down	Très agrégé	Large	Stratégies, programmes	Politiques supra-nationales (climat, négociations commerciales etc...)	Comptabilité consommation nationale
	Trade Balance						Responsabilité nationale et négociations d'objectifs
	MRIO						
	BTIO						
Mésoscopique	MFA	Hybride	Base de preuves		Politiques structurelles	Instruments économiques (taxes, subventions, schémas commerciaux); normes de secteurs etc...	Fuite des émissions de carbone, tarifs et commerce de CO ₂
	SRIO						Négociations avec secteurs d'activités
	Physical IO						
	Material Balance						
Microscopique	GHG Protocol	Processus Bottom-Up	Très détaillé	Spécifique	Instruments de régulation	Normes de produits ou de process, interdictions etc...	Empreinte écologique de produits et étiquetage informatif
	MRIO-LCA						
	LCA						

Figure 3. Modèles de calcul des émissions

Adaptée de Wiedmann *et al.* [7]

CGE : Computable General Equilibrium ; MRIO : Multi-Region Input-Output ; BTIO : Bilateral Trade Input-Output ; MFA : Material Flow Analysis ; SRIO : Single Region Input-Output

Les niveaux globaux d'émission issus des deux méthodes sont similaires, mais l'allocation entre les pays est différente, dépendant de la structure et du niveau d'agrégation des échanges de produits intermédiaires. Les deux méthodes servent des intérêts distincts : tandis que la méthode MRIO est capable de traiter du détail de la comptabilité de la consommation d'un pays, la méthode EEBT est utile pour faire les inventaires d'émission en considérant la demande globale du pays. La méthode EEBT sera donc plus appropriée pour analyser les échanges bilatéraux tandis que la méthode MRIO sera plus indiquée pour analyser les réseaux de consommation ou de production mondiaux.

Plusieurs études considèrent la méthode MRIO comme la mieux adaptée pour la mise en place d'échanges d'émission carbone [9, 10]. Néanmoins, sa mise en œuvre reste laborieuse

et les controverses vis-à-vis des multiples sources d'incertitudes et du manque de transparence méthodologique se multiplient.

L'approche MRIO peut être considérée comme un très grand tableau *input-output*. En théorie, une table MRIO pour n pays et m secteurs d'activités est une matrice de dimension $(m \times n, m \times n)$ (Fig. 4). Chaque colonne définit comment les besoins industriels d'une région sont satisfaits (production intérieure ou importation) et avec quelle valeur ajoutée. Chaque ligne indique les destinations des produits (demande industrielle intérieure ou extérieure ou demande finale des ménages). Ce qui signifie que, si un consommateur du pays A achète un produit fabriqué dans son pays, on prend également en compte les flux intermédiaires des pays B et C utilisés pour fabriquer les produits dans le pays A et consommés par les consommateurs du pays A (Fig. 5).

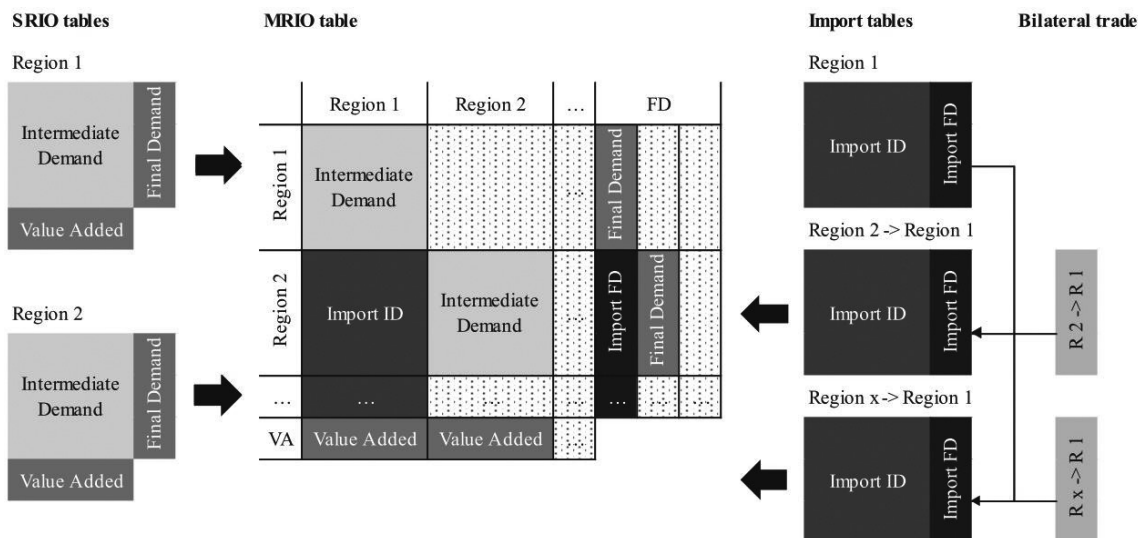


Figure 4. Construction d'une table MRIO [2]

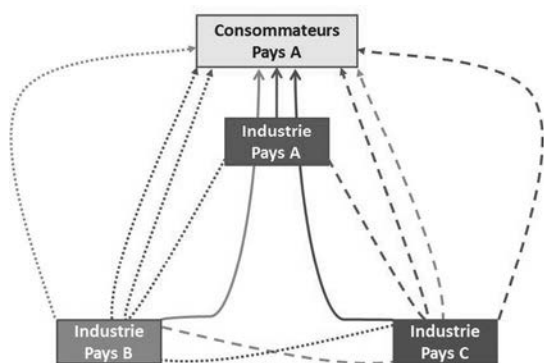


Figure 5. Flux pris en compte lors de la mesure des émissions relatives au pays A en utilisant l'analyse MRIO

4. Les limites de la méthode MRIO

Sato a réalisé une comparaison des variations entre les études pour le cas de la Chine (Fig. 6) [11]. La comparaison des émissions chinoises est faite entre sept études se basant sur des modèles SRIO (*Single Region Input Output*), BTIO et MRIO. Les deux premières colonnes représentent les déviations des résultats par rapport à la moyenne concernant la production d'émission et la consommation d'émission. Notons que les émissions liées à la consommation présentent des déviations beaucoup plus grandes, témoignant d'une

importante difficulté à les comptabiliser. Les colonnes suivantes *EEE*¹ et *EEI*² comparent les émissions inhérentes aux exportations et importations. Enfin, la dernière colonne permet d'observer dans quelles proportions la Chine exporte ou importe des émissions de CO₂. Seule la première étude de Weber *et al.* estime que la Chine est un importateur net d'émission tandis que toutes les autres définissent bien la Chine comme exportateur d'émission, mais à des degrés différents.

Ce graphique met en lumière les écarts qui peuvent exister entre les études dans la littérature (jusqu'à 2 Gt dans ce cas) et nous pouvons noter qu'aucune étude ne se dégage comme la plus proche de la moyenne sur l'ensemble des critères.

5. Sources d'erreurs et d'incertitudes

L'incertitude est une information tout aussi cruciale que les valeurs fournies par les méthodes de comptabilité. Les méthodes d'analyse *input-output* présentent de fortes incertitudes par rapport aux comptabilités territoriales car elles cherchent à associer des informations à la fois physiques et monétaires. L'incertitude

1. *Embodied Emissions in Exportations.*

2. *Embodied Emissions in Importations.*

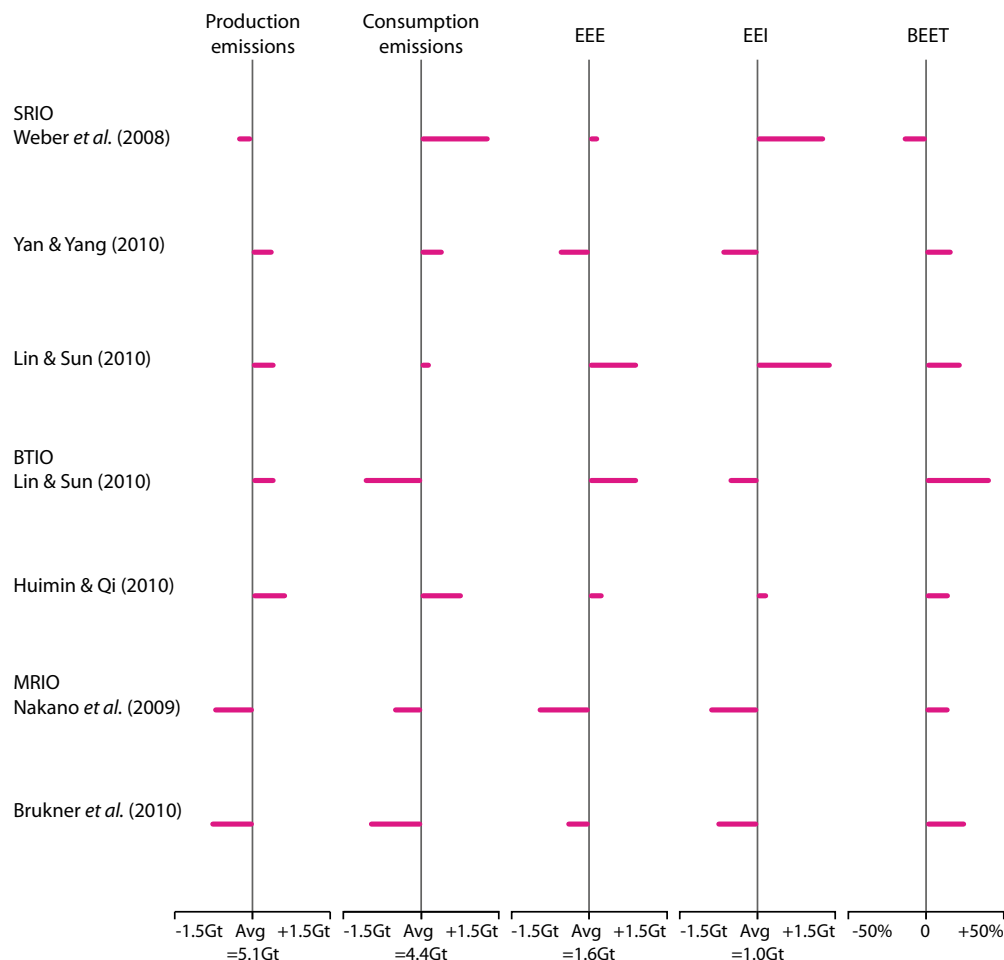


Figure 6. Comparaison d'estimations d'émissions de CO₂ pour la Chine à partir de différents types de comptabilité [11]

est présente dans les données sources, dans les attributions d'émission et l'équilibrage, dans l'agrégation, dans les divergences temporelles, dans les multiplicateurs ainsi que d'autres données d'entrée du modèle.

Les données primaires dépendent fortement de la façon dont celles-ci ont été compilées. Ces données sont fournies sur une base volontaire et ne sont quelques fois pas rendues publiques dans certains pays. Par ailleurs, il existe des différences méthodologiques entre les bases de données officielles d'enregistrement des données primaires (AIE, CITEPA, CNUCC, EUROSTAT, etc.).

En matière de données commerciales, la comparaison des statistiques de deux pays ne donne pas les mêmes résultats, à cause

notamment des différences entre les évaluations des coûts d'assurance et de fret ainsi que des coûts *free on board* pour les exportations.

Pour les données environnementales, l'évaluation des émissions se fait à partir de coefficients d'intensité. Or, ceux-ci sont difficiles à obtenir, notamment à un niveau de secteur désagrégé et pour les pays en développement.

L'harmonisation des secteurs d'activités est difficile dans les modèles MRIO. Par exemple, les États-Unis et le Japon produisent des tables comprenant environ 500 secteurs tandis que d'autres pays comme le Brésil n'en comptabilisent que 19. Le nombre de secteurs nécessaire pour légitimer une table MRIO varie en fonction des groupes de recherche (de 40 [12] à 150 secteurs [13]).

La plupart des méthodes de comptabilité des émissions reposent sur des données monétaires pour approximer les flux de biens. Or l'erreur associée à une hypothèse de proportionnalité entre les flux monétaires et les flux physiques est non négligeable (jusqu'à 40 % des émissions [14]). Par ailleurs, il est nécessaire d'émettre des hypothèses sur les cours du change : les résultats obtenus diffèrent si l'on utilise le taux de change ou bien la parité du pouvoir d'achat.

En résumé, l'incertitude pour l'établissement de tables MRIO ne peut être négligée, d'autant plus que les données nécessaires à l'établissement des tableaux entrées/sorties ne sont généralement pas accessibles avant trois ans, rendant difficile l'établissement de politiques environnementales. Ce décalage important peut être dépassé par des approximations mathématiques, engendrant alors des sources d'incertitudes supplémentaires.

6. Modélisation de transferts de carbone selon un modèle MRIO

Comme énoncé précédemment, les émissions de GES peuvent être imputées au producteur ou au consommateur. Le modèle développé ci-dessous a pour objectif de montrer l'influence de ces deux méthodes de prise en compte des émissions sur différents paramètres de l'économie ainsi que l'impact de l'implémentation de seuils d'émission maximaux de manière isolée à un pays ou à l'ensemble du monde.

Dans la lignée du modèle de substitution de Leontief développé par Dantzig en programmation linéaire sur un modèle *input-output*, Zhou *et al.* ont modélisé l'influence des fuites carbone à partir d'un système MRIO [12]. Le modèle développé ci-après généralise l'étude de Zhou *et al.* à trois pays disposant chacun de deux secteurs d'activités, donnant plus de liberté d'échange aux économies. Chaque secteur d'activités vend des biens dans les trois pays pour satisfaire à la fois la demande intermédiaire de ses industries et la demande finale de ses ménages.

L'objectif est de maximiser le bien-être mondial, défini comme la somme des bien-être nationaux, en se reposant sur la substitution entre la production domestique, les importations et les exportations, sous certaines contraintes technologiques, environnementales et de demande détaillées en annexe. Le bien-être d'un pays est modélisé comme son PIB diminué des coûts d'abattement.

Cinq scénarios ont été étudiés. Leurs caractéristiques sont résumées dans le Tableau 1.

Tableau 1

Les cinq scénarios

Réf.	S0	S1	S2	S3	S4
	Responsabilité producteur		Responsabilité consommateur		
CAP d'émission	-	A	A, B, C	A	A, B, C

Le modèle est structuré autour de plusieurs hypothèses. Dans le scénario de référence S0, aucun pays ne fait d'effort environnemental et la responsabilité des émissions est attribuée au producteur. La région A représente une région développée participant à la réduction des émissions quel que soit le scénario tandis que les régions B et C représentent deux pays qui ne participent pas nécessairement à la réduction des émissions. Le niveau d'émission maximal de chaque pays est fixé à 80 % du niveau correspondant dans le cas de référence S0. Le coût d'abattement pour la région A est plus important que pour les autres régions, considérant que ce pays développé utilise d'ores et déjà des technologies efficaces. Enfin, la région A étant supposée plus riche que les autres régions, la demande finale des ménages y est plus élevée quel que soit le secteur.

A) Les scénarios 0 à 2

Dans un premier temps, l'analyse portera sur les scénarios 0, 1 et 2 où la responsabilité des émissions est allouée aux producteurs.

Dans le *scénario 0*, aucun pays n'est soumis à un niveau d'émission maximum. Le bien être global est maximisé.

Dans le *scénario 1*, le pays A est soumis à un niveau d'émission maximal égal à 80 % de son

niveau d'émission en 0. Les émissions du pays A diminuent, mais les émissions des pays B et C augmentent (Fig. 7a) et, de ce fait, les émissions mondiales diminuent seulement de 4 %.

Dans le *scénario 2*, tous les pays ont un niveau d'émission maximum égal à 80 % de leur niveau d'émission en 0. Les émissions mondiales baissent alors fortement, d'environ 20 % (Fig. 7a), tandis que l'abattement augmente fortement dans les trois pays pour satisfaire à la fois la demande finale et les contraintes environnementales (Fig. 7b). Ces mesures de réduction des émissions expliquent une diminution importante du bien-être de chaque pays et du bien-être global du fait de la prise en compte de l'abattement sous forme quadratique dans la définition de la fonction de bien-être (Fig. 7c).

Concernant les balances commerciales (Fig. 7d-f), celle du pays A diminue dans le scénario 1 au profit du pays C, et ce, quel que soit le secteur : le pays A est moins compétitif puisqu'il est le seul à être soumis à un niveau d'émission maximum. Si tous les pays sont soumis à la même contrainte comme c'est le cas dans le scénario 2, alors le gain de compétitivité de certains pays est clairement identifiable. En effet, le pays B qui était jusque-là importateur devient exportateur net puisque son coût d'abattement est inférieur à celui du pays A. Le pays A devient importateur net puisque les émissions seront assumées par le pays B. À niveau d'émission fixé à un instant t_0 , c'est le pays qui a le coût d'abattement le plus fort qui sera le moins efficace sur le marché international.

B) Les scénarios 3 et 4

Les scénarios 3 et 4 associent la responsabilité des émissions au consommateur. Le scénario de référence S0 reste inchangé.

Le *scénario 3* impose le même niveau maximum d'émission au pays A que le scénario 1 (80 % des émissions du scénario de référence), les autres pays n'étant pas limités. Le bien-être du pays A n'est pas affecté dans le cas d'une responsabilité consommateur (Fig. 8c) contrairement à une comptabilité basée sur la responsabilité du producteur (Fig. 7c). En effet, le seuil d'émission maximum est calculé par

rapport au niveau d'émission du scénario 0 ; or, comme le montrent les balances commerciales (Fig. 8e,f), le pays A exporte une grande part de sa production. Dès lors, une bonne partie de ses émissions est destinée aux pays étrangers et le CAP imposé ne l'affecte pas en cas de responsabilité du consommateur. L'abattement d'émissions n'a donc lieu que dans le scénario 4 (Fig. 8b). Le passage de la responsabilité du producteur au consommateur affecte fortement le pays B (scénario 3, Fig. 8a) ; ses émissions sont alors valorisées à +74 % alors que celles du pays A et C sont revalorisées respectivement à -20 et -52 %. Le pays B va chercher à réduire ses importations si un seuil d'émission lui est imposé dans le cas d'une comptabilité consommateur.

Le *scénario 4* impose un CAP à 80 % du niveau d'émission du scénario 0 à tous les pays. Le pays B a le coût d'abattement le plus élevé. Pour limiter l'abattement induit par le changement de mode de comptabilité, le pays B réduit ses importations dans le secteur 1 et 2. Pour optimiser le bien-être de l'économie globale, les importations vont être réparties entre les pays A et C de sorte que le pays C devient importateur net de produits contrairement au cas où la responsabilité est supportée par le producteur (Figs. 7d, 8d).

Le niveau d'émission qui maximise le bien-être global est donc identique quelle que soit l'attribution de la responsabilité (scénario 2, Fig. 7a et scénario 4, Fig. 8a). Il est donc légitime de se demander si l'application de politiques d'émission aura un réel impact environnemental dans le cas où nous ne nous intéressons pas à la source même de ces émissions : les modes de consommation des pays.

Ce type de modèle d'optimisation linéaire donne un premier aperçu de l'influence de politiques unilatérales accompagnées d'une comptabilité internationale des émissions. Un approfondissement d'un tel programme, avec notamment une définition plus précise de la fonction de bien-être des pays, permettrait d'étayer les résultats et d'anticiper l'impact de la mise en place de certains mécanismes politiques.

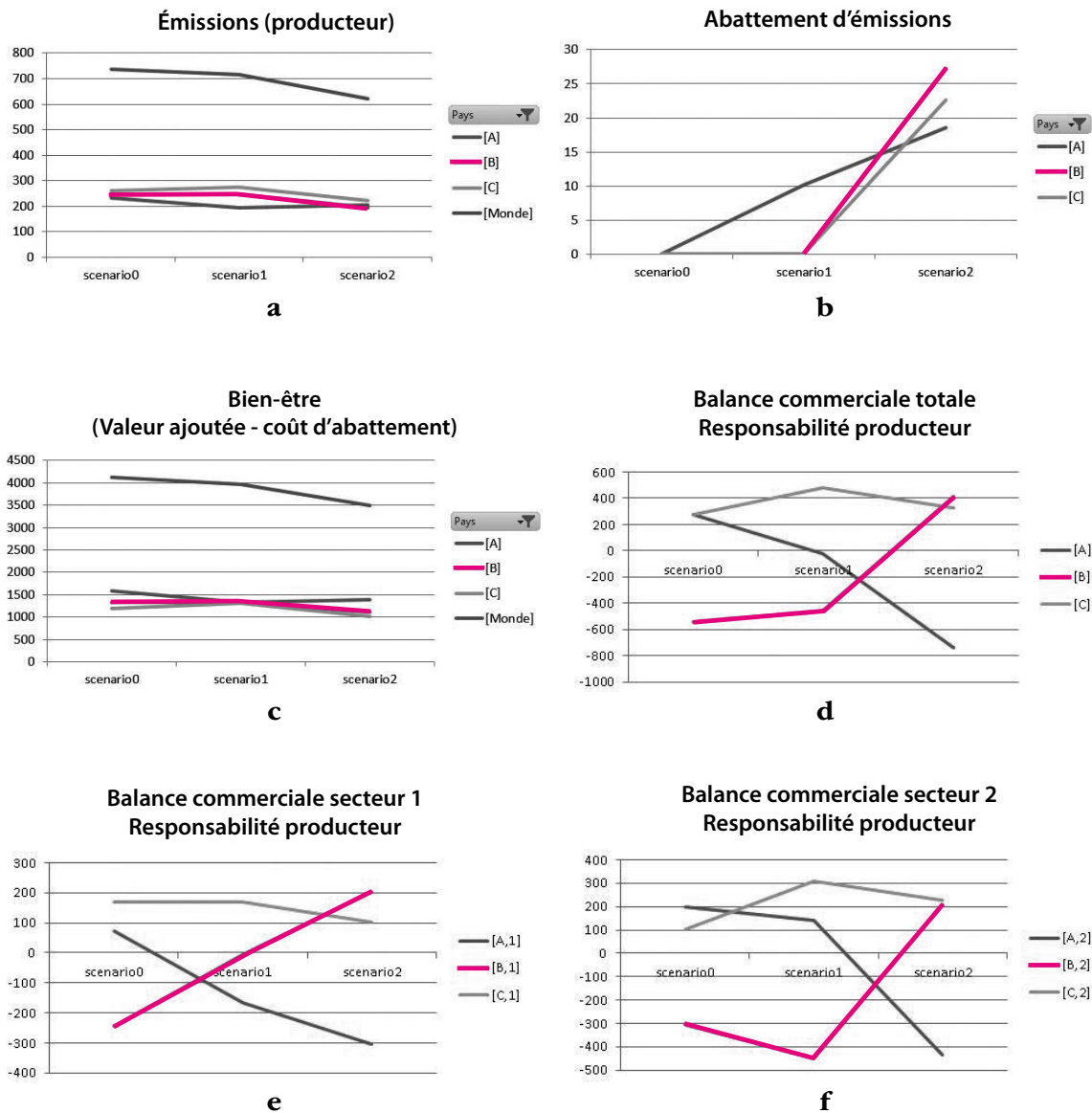


Figure 7. Résultats responsabilité producteur (scénarios 0, 1, 2)

7. Conclusion : définir de nouvelles règles lors de la COP21

La délocalisation des émissions de GES vers les havres de pollution concerne aujourd'hui tous les pays développés. Dès lors, les objectifs écologiques qui ont été fixés ou sont sur le point de l'être sont en réalité sous-estimés

du fait de l'absence de prise en compte des émissions liées à la consommation. Ce défaut des méthodologies de comptabilisation amoindrit l'impact des politiques incitatives dans les pays impliqués dans la lutte contre le changement climatique et freine les engagements des pays manufacturiers. La distribution de la responsabilité entre l'émetteur et le consommateur représente un enjeu majeur en matière de

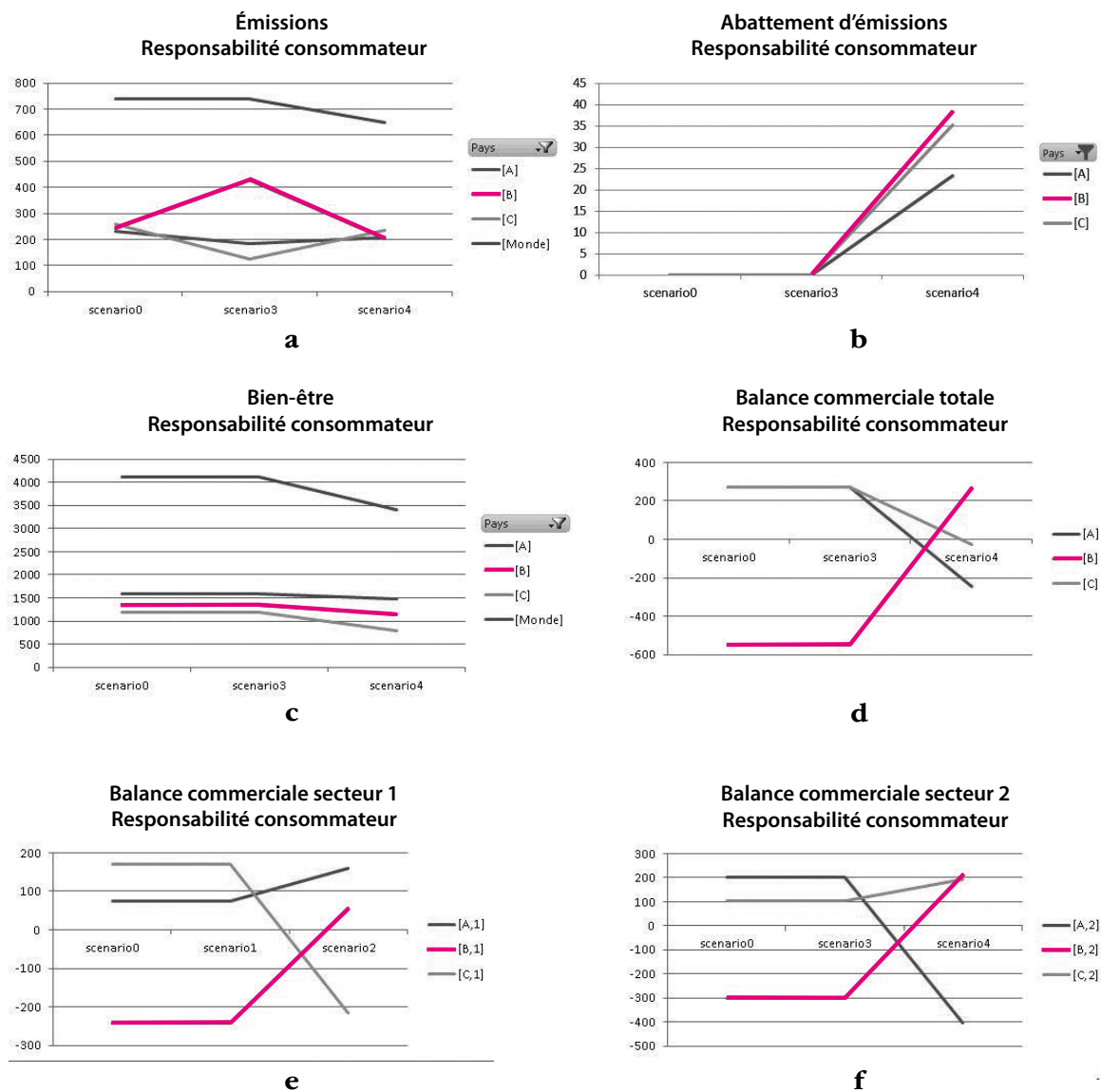


Figure 8. Résultats responsabilité consommateur (scénarios 0, 3, 4)

coopération mondiale et risque de bouleverser le commerce international.

L'analyse des émissions liées à la consommation à travers des modèles de comptabilité tels que les tables MRIO montre l'incroyable complexité des interdépendances économiques entre les pays, que ce soit en termes de matières premières, de produits intermédiaires ou de produits finals. Une coopération

internationale est essentielle avec, en premier lieu, une convergence des méthodes de comptabilité et une recherche accrue dans ce domaine afin de limiter les sources d'erreur et d'incertitudes.

L'établissement d'une politique équitable vis-à-vis des industries des pays s'engageant dans la lutte contre le réchauffement climatique est impossible si la majorité des pays du monde ne

signent pas un accord commun : comme exposé par le modèle de programmation linéaire, une asymétrie des politiques d'émission pénalisera toujours le pays ayant les coûts d'abattement les plus forts (pays industrialisés), incitant les entreprises à délocaliser, mais ne réduisant pas réellement les émissions mondiales. La fuite du carbone des pays européens devrait servir d'exemple à l'international : il ne sera pas possible de résoudre le problème du changement climatique sans s'attaquer aux modes de consommation des pays industrialisés et, de plus en plus, des pays émergents.

Si des mécanismes de lutte contre les émissions ont été mis en place au cours des dernières décennies, leurs cadres d'application ont été développés indépendamment. Aujourd'hui, environ 40 juridictions nationales et plus de 20 juridictions régionales participent à des marchés du carbone. Néanmoins, l'hétérogénéité des règles d'applications pourrait réduire à néant les bénéfices d'un marché mondial comme, par exemple, un prix du carbone largement accepté, une taille significative pour attirer des investissements, une stabilité du prix et une efficacité des coûts [15].

À l'heure actuelle, le protocole de Kyoto a été le seul instrument international et juridiquement contraignant de lutte contre le changement climatique. Cet accord est aujourd'hui dépassé par la réalité des échanges internationaux : en 2008, le transfert d'émission des pays en développement vers les pays industrialisés était en moyenne 3,5 fois plus important que les réductions d'émission couvertes par le protocole [16]. La COP21, programmée en décembre 2015, lors de laquelle un nouvel accord international devrait émerger, se doit de prendre en compte le retour d'expérience du protocole de Kyoto. Serons-nous capable de concilier intérêts nationaux (croissance, emplois, bien-être...) et bien public à l'échelle internationale ? ■

Bibliographie

- [1] G.M. Grossman, A.B. Krueger, "Economic Growth and the Environment", *National Bureau of Economic Research - Working Paper Series* 4634, 1994.

- [2] K. Kanemoto, J. Murray, "What is MRIO: Benefits and Limitations", *The sustainability practitioner's guide to multi-regional input-output analysis*, Champaign, Illinois, USA, Common Ground Publishing LLC, 2013, pp. 22-32.
- [3] S. Bastianoni, F.M. Pulselli, E. Tiezzi, "The problem of assigning responsibility for greenhouse gas emissions", *Ecological Economics*, vol. 49, n° 13, pp. 253-257, 2004.
- [4] H.T. Odum, *Environmental Accounting: Emergy and Environmental Decision Making*, John Wiley & Sons, 1996.
- [5] The Carbon Trust, "The carbon emissions generated in all that we consume", Londres, 2006.
- [6] G. Sinden, "Consumption-based accounting workshop - Implications for Policy", Imperial College London, Londres, 2011.
- [7] T. Wiedmann, H. Witting, M. Lenzen, S. Lutter, V. Palm, "Quo Vadis MRIO? Methodological, data and institutional requirements for multi-region input-output analysis", *Ecological Economics*, vol. 6, n° 111, pp. 1937-1945, 2011.
- [8] M.R. & P. Blair, *Input-Output Analysis : Foundations and Extensions*, Cambridge University Press, Cambridge, 2009.
- [9] X. Liu, C. Wang, "Quantitative analysis of CO₂ embodiment in international trade", *Frontiers of environmental science and Engineering in China*, vol. 3, n° 11, pp. 12-19, 2009.
- [10] G. Peters, C. Solli, *Global carbon footprints : Methods and import and export corrected results from the Nordic countries in global carbon footprint studies*, Norden: The Nordic Council and Nordic Council of Ministers, Copenhagen, 2010.
- [11] M. Sato, *Embodied carbon in trade : a survey of the empirical literature*, Centre for climate change economics and policy, 2012.
- [12] X. Zhou, H. Shirakawa, H. Pan, "Can consumer responsibility help address carbon leakage concerns? An analysis of participation vs. non-participation in a global mitigation regime", *China-USA Business Review*, vol. 11, n° 13, pp. 408-422, 2012.
- [13] A. Tukker, E. Poljakov, R. Heijungs, T. Hawkins, F. Neuwahl, J. Rueda-Cantuche, S. Giljum, S. Moll, J. Oosterhaven, "Towards a global multi-regional environmentally extended input-output database", *Ecological Economics*, vol. 68, n° 17, pp. 1928-1937, 2009.
- [14] M. Lenzen, "Primary energy greenhouse gases embodied in Australian final consumption : an input-output analysis", *Energy Policy*, vol. 26, n° 16, pp. 495-506, 1998.
- [15] World Bank, "Globally Networked Carbon Markets", 1 December 2014 [en ligne]. Available: <http://www.worldbank.org/en/topic/climatechange/brief/globally-networked-carbon-markets>.
- [16] G. Peters, J. Minx, C. Weber, O. Edenhofer, "Growth in emission transfers via international trade from 1990 to 2008", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 108, n° 121, pp. 8903-8908, 2011.

Résumé des données et hypothèses utilisées dans le modèle d'optimisation numérique

Soit row le reste du monde et P_s^r la production du secteur s de la région r . La production de la région r_k (k représentant le pays A, B ou C) satisfait en partie les demandes intermédiaires et finales des trois régions, ce qui s'écrit :

$$P_s^{r_k} = I_s^{r_k \rightarrow r_k} + \sum_{r \in row} I_s^{r_k \rightarrow r} + F_s^{r_k \leftarrow r_k} + \sum_{r \in row} F_s^{r \leftarrow r_k}$$

où :

- $I_s^{r_k \rightarrow r_k}$ et $I_s^{r_k \rightarrow r}$ sont les parts de productions du secteur s dans la région r_k qui satisfont les demandes intermédiaires respectives des régions r_k et du reste du monde.
- $F_s^{r_k \leftarrow r_k}$ et $F_s^{r \leftarrow r_k}$ sont les parts des demandes finales en produit du secteur s dans les régions r_k et le reste du monde qui sont satisfaites par la région r_k .

La demande finale de la région r est fixée et le modèle impose qu'elle doive nécessairement être satisfaite, que ce soit avec de la production domestique ou de la production importée :

$$f_s^{r_1} = (F_s^{r_1 \leftarrow r_1} + \sum_{r \in row} F_s^{r_1 \leftarrow r})$$

La non-substituabilité parfaite des biens est prise en compte par un niveau de demande domestique minimum de biens importés β (en %) :

$$\sum_{r \in row} F_s^{r_1 \leftarrow r} \geq \beta_s^{r_1} f_s^{r_1}$$

Les matrices de Leontief de chaque région notées A^r représentent les interdépendances entre les secteurs d'activités. Les coefficients techniques de ces matrices, supposés fixes dans le modèle, représentent les besoins des industries entre elles.

$$A^r = \begin{pmatrix} a_{1,1}^r & a_{1,2}^r \\ a_{2,1}^r & a_{2,2}^r \end{pmatrix}$$

où $a_{i,j}^r$ représente le besoin du secteur i en produit du secteur j dans le pays r .

Soit V^r le vecteur représentant le ratio de valeur ajoutée des secteurs de chaque région. La production de chaque région s'écrit alors :

$$P^r = A^r \cdot P^r + V^r \cdot F^r$$

Les émissions nationales peuvent être comptabilisées en unités produites ou en unités consommées. En notant Q^r la quantité d'émission par unité produite dans le secteur s de la région r on obtient :

Émissions basées sur la production de biens

$$E_{s,prod}^r = Q_s^r P_s^r$$

où $E_{s,prod}^r$ est la quantité d'émission sous la responsabilité des producteurs de la région r et du secteur s et Q_s^r est la quantité de CO_2 émise par le secteur s dans la région.

Émissions basées sur la consommation de biens

$$E_{s,conso}^r = Q_s^r (I_s^{r_1 \rightarrow r_1} + F_s^{r_1 \leftarrow r_1}) + \sum_{r \in row} Q_s^r (I_s^{r \rightarrow r_1} + F_s^{r_1 \leftarrow r})$$

où $E_{s,conso}^r$ est la quantité d'émission sous la responsabilité des consommateurs de la région r_1 et du secteur s .

L'imposition à une région d'un niveau maximal d'émission CAP s'écrit de deux façons différentes suivant l'angle d'approche des émissions que l'on prend (producteur ou consommateur) :

$$\sum_{s \in \text{secteurs}} E_{s,prod}^r \leq CAP^r \text{ ou } \sum_{s \in \text{secteurs}} E_{s,conso}^r \leq CAP^r$$

Ce niveau d'émission maximal implique un nouveau niveau de décision pour chaque région considérée. En effet, il s'agit soit de valoriser son PIB en produisant suffisamment, exportant et en recourant à des procédés d'abattement des émissions ou de favoriser l'environnement en respectant le quota, et importer des biens au dépend du PIB national. La quantité d'abattement des émissions dans la région r est prise en compte par une nouvelle variable de décision : γ_r . Le coût associé augmente de façon quadratique pour prendre en compte le coût marginal croissant pour abattre les émissions.

En considérant l'abattement γ , l'équation précédente devient alors :

$$\sum_{s \in \text{secteurs}} E_{s,prod/conso}^r - \gamma_r^2 \leq CAP^r$$

Le bien-être national W^r se calcule comme la somme des valeurs ajoutées diminuée des coûts d'abattement environnementaux.

$$W^r = \sum_{s \in \text{secteurs}} V_s^r P_s^r - c^r \gamma^r$$

La fonction Objectif Global est définie comme la somme des bien-être nationaux. L'optimisation peut donc se faire sur les niveaux de productions de chaque pays, les échanges bilatéraux et la réduction des émissions domestiques.