

Spécialisation internationale et partage de la charge en matière de réduction de la pollution*

Thierry Bréchet[†], Marc Germain[‡], Philippe Monfort[§]

Octobre 2003

Abstract

L'allocation de permis d'émission, notamment celle s'inscrivant dans le cadre du Protocole de Kyoto pour six gaz à effet de serre (GES), a suscité et suscitent encore de vives discussions politiques sur la question de savoir qui (quel pays ou quelle région) devrait supporter un effort plus ou moins important et quelle serait la manière adéquate de distribuer les quotas de permis entre les entités affectées par le Protocole. Le présent article vise à contribuer à ce débat dans le cadre d'une petite économie ouverte multi-régionale, où l'une des régions est plus spécialisée dans la production de biens et services intensifs en émissions polluantes. Différents scénarios de partage de l'effort national de réduction des émissions entre les deux régions sont analysés. On montre notamment qu'une réduction proportionnelle des émissions (ou des dotations de permis) régionales affecte plus le bien-être de la région spécialisée dans la production intensive en émissions polluantes. Un autre résultat est qu'il n'est pas possible de concevoir un scénario qui soit à la fois efficace, équitable et sans transferts interrégionaux. Les conclusions quant aux impacts des différents scénarios sur le bien-être des régions sont indépendantes de la présence ou non d'un marché international de permis d'émission.

Mots clés : Changement climatique, spécialisation internationale, commerce international, burden sharing.

Classification JEL : F18, H23, Q25, D63.

*Les auteurs ont bénéficié des discussions dans le cadre des Ateliers de l'Environnement (CORE), et en particulier des commentaires de Henry Tulkens, Vincent van Steenberghe et Stéphane Lambrecht, ainsi que de Jacques Cornet, de la Direction générale des Ressources naturelles et de l'Environnement de la Région wallonne.

[†]Chaire Lhoist Berghmans et CORE, Université catholique de Louvain

[‡]CORE, Université catholique de Louvain. Email : germain@core.ucl.ac.be.

[§]IRES, Université catholique de Louvain.

1 Introduction

L'allocation de permis d'émission, notamment celle s'inscrivant dans le cadre du Protocole de Kyoto pour six gaz à effet de serre (GES), a suscité de vives discussions politiques sur la question de savoir qui (quel pays ou quelle région) devrait supporter un effort plus ou moins important et quelle serait la manière adéquate de distribuer les quotas de permis entre les entités affectées par le Protocole. En Belgique, Etat fédéral comportant trois régions (La Flandre, la Wallonie et la Région de Bruxelles-Capitale), le débat oppose en particulier les Régions flamande et wallonne. Par rapport aux autres régions, la Région wallonne est en effet caractérisée par une industrie davantage consommatrice d'énergie. La Flandre voudrait donc voir le gros de l'effort de réduction des émissions se concentrer en Wallonie (là où les réductions d'émission sont présumées les moins chères), tandis que la Wallonie estime qu'une telle solution lui serait par trop défavorable. Au Canada, certaines provinces, dont l'Alberta qui concentre nombre d'activités émettrices de GES¹, se sont fermement opposées à la ratification du Protocole de Kyoto par ce pays (Nolet et Blais, 2002)².

Or, dans le cadre du débat sur le partage de la charge, il importe de souligner que le fait que les activités d'un pays (ou région) soient davantage consommatrices d'énergie ne résulte pas forcément de leur inefficacité. Il peut aussi résulter de la spécialisation de ce pays dans la production de biens relativement exigeants en énergie pour leur fabrication, spécialisation elle-même conditionnée par ses avantages comparatifs, et dont l'exploitation à travers l'échange est susceptible de bénéficier aux différents pays participant à ce dernier.

Plusieurs contributions ont éclairé cette question du partage de la charge entre pays ou régions. Phylipsen et al (1998) et Groenenberg et al (2001) utilisent une approche sectorielle "en trois volets" (dénommée en anglais "Triptych approach")³ : le secteur producteur d'électricité, l'industrie intensive en énergie et ouverte au commerce international et les autres secteurs tournés vers le marché domestique. Cette approche tient compte de différences dans les caractéristiques nationales, telles que la population, la croissance, le niveau de vie, la structure économique et la composition du vecteur énergétique utilisé pour la production d'électricité. Elle a été notamment appliquée dans le cadre de la négociation du partage de la charge entre pays de l'Union européenne suite à la signature du Protocole de Kyoto⁴, négociation dont elle a facilité l'aboutissement en éclairant les négociateurs quant aux différences de contextes nationaux et à leur rôle dans la détermination des niveaux d'émission.

Ce partage a conduit pour la Belgique à un objectif de réduction de ses émissions de 7,5% pour la période 2008-2012 par rapport à leur niveau de 1990. L'étude de PricewaterhouseCoopers (2002) a visé, quant à elle, à nourrir le débat autour de la réalisation de cet objectif en analysant l'impact de différents scénarios de partage de la charge sur les trois régions de Belgique ainsi que sur l'Etat fédéral⁵.

¹Selon les projections du GAM (Groupe d'analyse et de modélisation), un groupe de travail d'analyse fédéral-provincial-territorial du Canada, l'Alberta sera la province qui émettra le plus de GES en 2010 (GAM, 2002).

²Le Canada a cependant finalement ratifié le Protocole de Kyoto en décembre 2002.

³Cette approche est aussi décrite dans la partie du site du RIVM (Rijksinstituut voor Volksgezondheid & Milieu, Pays-Bas) relative au Framework to Assess International Regimes for burden sharing (FAIR) : <http://www.rivm.nl/fair/home.html>.

⁴L'approche "en trois volets" a aussi été utilisée par le Groupe d'analyse et de modélisation dans le cadre de l'étude des implications possibles du Protocole de Kyoto pour le Canada (GAM, 2002).

⁵Ce débat est toujours en cours au moment où ces lignes sont écrites. Réalisée à la demande du Secrétariat d'Etat belge à l'énergie et au développement durable, l'étude de PricewaterhouseCoopers élabore des courbes de coûts marginaux de réduction des émissions relativement sommaires pour 20 secteurs d'activité.

Malgré leur intérêt en termes d'aide à la décision, les études précédentes sont cependant limitées sur le plan méthodologique par leur approche du type "bottom-up", sans bouclage macroéconomique ou analyse d'équilibre général. Une série d'impacts indirects ou induits ne peuvent par conséquent pas y être pris en considération. Et elles ne conviennent pas pour l'évaluation des impacts de critères de partage de la charge sur le revenu (national ou régional) des parties concernées⁶. Or par construction, ces derniers critères sont les plus indiqués si l'on veut mesurer les effets globaux (directs et induits) d'une politique de réduction de la pollution sur le bien-être d'un pays. Différentes contributions récentes (à l'exemple de Antweiler et al (2001), Copeland et Taylor (2001, 2003), Chander et Kahn (1998), et de nombre d'articles repris dans Batabyal et Beladi (2001)) sont instructives pour se soustraire à ces problèmes. Celles-ci ne visent pas tant à répondre à la question du partage équitable de la charge qu'à contribuer au débat autour des conséquences du commerce international sur l'environnement⁷. Mais certains modèles d'économie internationale qui y sont développés paraissent bien adaptés pour prendre en compte le fait que certains pays, de par leur technologie ou leur dotation en facteurs de production, sont de plus ou moins grands pollueurs. Par l'entremise du commerce international, les décisions prises par un pays ont des répercussions dans les pays partenaires, ce qui fait de tels cadres des outils particulièrement pertinents pour étudier la question de la distribution des quotas de permis d'émission.

De ce point de vue, la contribution de Copeland et Taylor (2003) est intéressante à plus d'un titre. Dans le cadre d'un modèle à la Hecksher-Ohlin, ils mettent en évidence les effets d'une réduction d'émission et montrent que les résultats obtenus sont sensiblement différents de ceux dérivés sans tenir compte du commerce international. En particulier, leurs résultats montrent que, contrairement au cadre d'économie fermée, il peut exister une infinité de manières efficaces de réduire les émissions polluantes, ce qui ouvre la possibilité de prendre en compte des aspects distributifs et/ou d'équité sans pour autant devoir renoncer à atteindre une allocation optimale des facteurs de production.

Les hypothèses du modèle d'Hecksher-Ohlin sont cependant très restrictives et ses prédictions stéréotypées. En particulier, ce modèle convient pour décrire une perspective de long terme où les facteurs de production sont censés être parfaitement mobiles entre secteurs, ce qui est en général considéré comme trop restrictif. Une telle mobilité ne peut être considérée comme plausible à court ou moyen terme, et est même discutable dans un certain nombre de cas à long terme. Par ailleurs, les conclusions obtenues par Copeland et Taylor (2003) reposent sur un résultat du modèle d'Hecksher-Ohlin, à savoir que le commerce international devrait mener à une égalisation complète des prix des facteurs de production entre les pays participants à ce commerce, ce qui est souvent considéré comme une conclusion inobservable dans la réalité. Elle est en effet le résultat de l'hypothèse que les pays participant au commerce soient tous dotés de la même technologie et que le commerce soit libre de tout coût de transaction, institutionnel et/ou naturel.

En voulant contribuer au débat autour du partage de l'effort de réduction des émissions polluantes, la présente contribution se rapproche de Phylipsen et al (1998), Groenenberg

⁶Ces critères de partage de la charge en termes de bien-être ou de revenu (*outcome based criteria*) se distinguent des critères en termes d'allocation de permis (*allocation based criteria*). Ces derniers critères sont les seuls utilisables en l'absence d'un cadre d'équilibre général. Voir Rose et al (1998) pour une classification de différents critères d'équité en matière de partage de l'effort de réduction dans le domaine du changement climatique.

⁷Si d'aucuns soulignent les avantages que les pays concernés peuvent obtenir par la spécialisation et l'échange (notamment via l'exploitation des avantages comparatifs ou des rendements d'échelle), d'autres mettent en avant certains effets pervers du commerce international sur l'environnement : spécialisation de certains pays dans des activités particulièrement polluantes, commerce de substances dangereuses (dont des déchets), abaissement des normes nationales en matière environnementale pour attirer les investissements étrangers.

et al (2001), et PricewaterhouseCoopers (2002). En revanche, par son approche en terme d'équilibre général, elle se situe plutôt dans le deuxième courant de littérature mentionné ci-dessus. Le modèle de petite économie ouverte multirégionale développé dans ce papier présente toutefois certaines particularités, notamment par rapport à celui utilisé par Copeland et Taylor (2003). Le choix s'est porté sur un modèle à *facteurs spécifiques* pour les raisons suivantes: (i) le modèle correspond davantage à une analyse de court terme et semble donc un complément naturel à celui évoqué ci-dessus, (ii) il ne mène pas à une égalisation du prix des facteurs et permet donc de décrire des effets de prix qui ne peuvent pas être capturés par un modèle à la Hecksher-Ohlin et (iii) il est particulièrement approprié pour mettre en exergue des effets du commerce international se différenciant d'un secteur industriel à l'autre, ce qui nous semble précieux pour analyser les effets de la distribution des quotas de permis d'émission. Ce cadre devrait permettre de mettre en lumière l'impact des réductions d'émissions sur le système de prix. Un tel effet est des plus probables dans la réalité et constitue un autre canal important au travers duquel les performances économiques devraient être affectées par ces réductions. La question d'un éventuel trade-off entre efficacité et équité des allocations de quotas énergétiques devrait aussi être selon nous réexaminée dans un telle perspective.

Le papier s'organise de la façon suivante. La section 2 présente le modèle d'une petite économie ouverte divisée en deux régions, avec deux secteurs d'activité et trois facteurs de production (l'énergie et deux facteurs spécifiques à chacun des deux secteurs). La section 3 rassemble quelques résultats préliminaires utiles pour l'analyse des scénarios de réduction des émissions présentés dans les sections suivantes. La section 4 envisage la situation où l'effort de réduction prend place dans un cadre strictement national. On y analyse différents scénarios de partage de l'effort entre les deux régions : (i) un scénario *de réduction proportionnelle* qui prévoit une même réduction relative des émissions régionales; (ii) un scénario *de réduction optimal* qui suppose que l'effort national se réalise au moindre coût, chaque région assumant elle-même la part de la charge que lui impose l'objectif national; (iii) deux scénarios *d'égal sacrifice*, l'un avec transfert interrégional, l'autre non, construits de telle façon que les impacts en termes de perte de revenu soient identiques à travers les régions. La section 5 reconsidère les scénarios précédents dans le contexte où existe un marché international de permis d'émission négociables, tel que celui prévu par le Protocole de Kyoto par exemple, ou encore par la récente proposition de directive européenne pour les GES émis par certaines activités industrielles⁸. La conclusion résume les principaux résultats.

2 Le modèle

On distingue 2 secteurs de production $i = 1, 2$ caractérisés par les fonctions de production suivantes :

$$Y_1 = f_1(E_1, F) \quad (1)$$

$$Y_2 = f_2(E_2, G) \quad (2)$$

où E_i est l'énergie consommée par le secteur, et F et G sont deux facteurs agrégeant tous les autres facteurs non énergétiques (travail, capital humain, infrastructures, ressources naturelles, tradition industrielle,...) et respectivement spécifiques aux secteurs 1 et 2. Afin de simplifier les notations, E désignera à la fois la consommation énergétique et les émissions polluantes⁹. Ces deux fonctions sont supposées homogènes de degré 1, ce qui permet de les réécrire :

⁸Voir www.effet-de-serre.gouv.fr/fr/contexte/Directivepermis.DOC.

⁹Ce qui revient à supposer une relation de proportionnalité entre consommation énergétique et émissions polluantes.

$$Y_1 = Fy_1(\varepsilon_1) \quad (3)$$

$$Y_2 = Gy_2(\varepsilon_2) \quad (4)$$

où $\varepsilon_1 = E_1/F$ et $\varepsilon_2 = E_2/G$ sont les rapports énergie/autres facteurs des secteurs 1 et 2. Les fonctions y_i ($i = 1, 2$) sont strictement croissantes ($y_i' > 0$) et concaves ($y_i'' < 0$) sur R .

On distingue par ailleurs deux régions, V et W , faisant partie de la même entité nationale. Ces deux régions produisent les deux biens, 1 et 2, au moyen de technologies identiques décrites par les fonctions de production (3) et (4), et en utilisant leurs dotations de facteurs spécifiques F_j et G_j ($j = V, W$) supposées strictement positives.

L'énergie est entièrement importée au prix q . L'énergie subit une taxe égale à τ et commune aux deux régions. En outre, l'entreprise doit détenir un permis d'émission pour chaque unité polluante émise. Les permis sont échangeables sur un marché international de permis au prix unitaire π . Le prix total de l'énergie est donc égal à $h = q + \tau + \pi$. Le pays échange les produits 1 et 2 aux prix p_1 et p_2 avec le Reste du Monde et est supposé price-taker sur les marchés internationaux. q , p_1 , p_2 et π sont donc considérés comme exogènes. En revanche, les facteurs spécifiques F et G ne sont pas parfaitement mobiles (y compris entre régions) et leurs prix respectifs r_F et r_G sont endogènes.

Dans un contexte de concurrence parfaite, les firmes minimisent leurs coûts de production. Dans le cas de la firme représentative du secteur 1 et de la région W , le problème s'énonce :

$$\min_{\varepsilon_{W1}, F_W} [[q + \tau + \pi]\varepsilon_{W1} + r_{FW}]F_W \quad \text{s.c.q.} \quad Y_{W1} = F_W y_1(\varepsilon_{W1}) \quad (5)$$

où $\varepsilon_{W1}F_W = E_{W1}$ est l'énergie consommée par cette firme et r_{FW} est la rémunération du facteur F au sein de la région W . Les conditions du premier ordre conduisent à :

$$\lambda y_1'(\varepsilon_{W1}) = q + \tau + \pi \quad (6)$$

$$\lambda[y_1(\varepsilon_{W1}) - \varepsilon_{W1}y_1'(\varepsilon_{W1})] = r_{FW} \quad (7)$$

où λ est le multiplicateur de la contrainte dans le lagrangien associé au problème (5).

L'hypothèse de concurrence parfaite implique que les profits soient nuls. Cela suppose pour les firmes du secteur 1 et de la région W que :

$$p_1 Y_{W1} = [[q + \tau + \pi]\varepsilon_{W1} + r_{FW}]F_W \quad (8)$$

qui implique, après usage de la contrainte du problème (5), que :

$$p_1 y_1(\varepsilon_{W1}) = [q + \tau + \pi]\varepsilon_{W1} + r_{FW} \quad (9)$$

La substitution de (6) et (7) dans la condition précédente conduit à $\lambda = p_1$ et aux relations suivantes :

$$q + \tau + \pi = p_1 y_1'(\varepsilon_{W1}) \quad (10)$$

$$\frac{r_{FW}}{q + \tau + \pi} = \frac{y_1(\varepsilon_{W1})}{y_1'(\varepsilon_{W1})} - \varepsilon_{W1} \quad (11)$$

Ces deux équations permettent de calculer l'intensité énergétique ε_{W1} et la rémunération du facteur F , r_{FW} , en fonction des exogènes q et p_1 .

Des équations similaires à (10) et (11) peuvent être déduites pour l'autre secteur et/ou région. En les rapprochant, et en observant que les prix q , p_1 , p_2 , π ainsi que le niveau de taxation τ ne dépendent pas des régions, il découle que les intensités énergétiques et les rémunérations des facteurs spécifiques s'égalisent entre régions. Autrement dit, on obtient que $\varepsilon_{Vj} = \varepsilon_{Wj} = \varepsilon_j$ ($j = 1, 2$), $r_{FV} = r_{FW} = r_F$, $r_{GV} = r_{GW} = r_G$, avec en résumé :

$$q + \tau + \pi = p_i y'_i(\varepsilon_i), \quad i = 1, 2 \quad (12)$$

$$\frac{r_F}{q + \tau + \pi} = \frac{y_1(\varepsilon_1)}{y'_1(\varepsilon_1)} - \varepsilon_1 \quad (13)$$

$$\frac{r_G}{q + \tau + \pi} = \frac{y_2(\varepsilon_2)}{y'_2(\varepsilon_2)} - \varepsilon_2 \quad (14)$$

Connaissant les intensités énergétiques, les prix et dotations régionales des facteurs spécifiques, on peut calculer les productions par région et par secteur grâce aux fonctions de production (3) et (4) :

$$Y_{j1} = F_j y_1(\varepsilon_1), \quad j = V, W \quad (15)$$

$$Y_{j2} = G_j y_2(\varepsilon_2), \quad j = V, W \quad (16)$$

Par définition des intensités énergétiques, les consommations énergétiques par secteur et région s'écrivent :

$$E_{j1} = \varepsilon_1 F_j, \quad j = V, W \quad (17)$$

$$E_{j2} = \varepsilon_2 G_j, \quad j = V, W \quad (18)$$

La consommation énergétique par région s'écrit par conséquent :

$$E_j = \varepsilon_1 F_j + \varepsilon_2 G_j, \quad j = V, W \quad (19)$$

Le revenu primaire régional (RPR) de chaque région s'écrit comme la somme de la valeur ajoutée des deux secteurs avant transferts éventuels :

$$I_j = \sum_{i=1}^2 [p_i Y_{ji} - q E_{ji}], \quad j = V, W \quad (20)$$

Dans notre modèle simple, la consommation intermédiaire se limite aux importations d'énergie. Compte tenu de (8), le RPR peut se réécrire en termes de revenus :

$$I_j = r_F F_j + r_G G_j + [\tau + \pi] E_j, \quad j = V, W \quad (21)$$

où E_j est la consommation énergétique totale de la région j .

Le revenu disponible régional (RDR) peut diverger du RPR en fonction d'éventuels transferts entre régions ou avec l'étranger. Formellement, le transfert *total* reçu ou versé par la Région j s'écrit :

$$\theta_j = \pi[\bar{E}_j - E_j] + T_j, \quad j = V, W \quad (22)$$

Le premier terme représente la vente ou l'achat de permis d'émission réalisés par la Région j sur le marché de permis international ($\bar{E}_j$ est la dotation de permis d'émission attribuée à cette région). T_j regroupe tous les autres transferts interrégionaux (avec $\sum_j T_j = 0$).

Le RDR se définit de la façon suivante :

$$J_j = I_j + T_j + \pi[\bar{E}_j - E_j], \quad j = V, W \quad (23)$$

Etant donné (21), (23) peut alors se réécrire :

$$J_j = r_F F_j + r_G G_j + T_j + \tau E_j + \pi \bar{E}_j, \quad j = V, W \quad (24)$$

Le consommateur représentatif de la région est supposé maximiser une fonction d'utilité dépendant de sa consommation de biens 1 et 2, sous la contrainte que sa demande de biens en valeur ne dépasse pas son revenu disponible. Par soucis de simplicité, on suppose que la fonction d'utilité est homogène de degré 1. Dans ce cas, l'utilité est linéairement proportionnelle au RDR, et donc variations relatives d'utilité et de revenu disponible se confondent. Par la suite, nous pourrions donc nous limiter à analyser l'impact de scénarios de partage de l'effort national de réduction des émissions sur les RDR des deux régions.

L'impact de ces scénarios sera évalué à un équilibre caractérisé par les équations (12) à (24), où en outre on suppose qu'il n'y a pas de transferts, autrement dit que :

$$T_j = 0, \quad \bar{E}_j = E_j \text{ et } I_j = J_j, \quad j = V, W \quad (25)$$

Il y a donc égalité entre revenus régionaux primaires et disponibles. Par la suite, on parlera indifféremment de l'*origine* ou de l'*équilibre initial* pour désigner le point où se calculent les variations de RDR induites par les mesures de réduction d'émissions. Il importe de souligner que si l'origine se caractérise par l'absence de transferts, cela n'empêche pas que ceux-ci puissent accompagner l'effort de réduction des émissions, de façon à moduler les impacts respectifs de cet effort sur les bien-être régionaux. Dans la présente contribution, seuls de tels transferts seront donc pris en considération par la suite.

3 Hypothèses et résultats préliminaires

Nous commençons par formuler trois hypothèses importantes pour l'obtention des résultats qui suivent. Les deux premières concernent l'équilibre initial, la troisième les dotations en facteurs spécifiques des deux régions.

Les secteurs se différencient par l'intensité avec laquelle l'énergie y est utilisée. Sans perte de généralité, le secteur 1 est supposé être plus intensif en énergie que le secteur 2. Dans ce cadre particulier à trois facteurs dont deux sont spécifiques, l'intensité factorielle se définit à partir de la part des facteurs dans la valeur de la production ou, de manière équivalente, dans la valeur des inputs utilisés. Le secteur 1 est donc plus intensif en énergie que le secteur 2 au sens où :

$$\text{Hypothèse 1 : } \frac{hE_1}{p_1 Y_1} = \frac{hE_1}{hE_1 + r_F F} > \frac{hE_2}{p_2 Y_2} = \frac{hE_2}{hE_2 + r_G G} \quad (26)$$

où par définition

$$h = q + \tau + \pi \quad (27)$$

et où les productions et consommations énergétiques sectorielles (Y_i et E_i , $i = 1, 2$), ainsi que le prix des facteurs r_F et r_G sont calculés à l'origine.

La deuxième hypothèse concerne les fonctions de production, à savoir :

$$\text{Hypothèse 2 : } \frac{\varepsilon_1 y_1''(\varepsilon_1)}{y_1'(\varepsilon_1)} > \frac{\varepsilon_2 y_2''(\varepsilon_2)}{y_2'(\varepsilon_2)} \quad (28)$$

où les intensités énergétiques sectorielles (ε_i , $i = 1, 2$) sont calculées à l'origine. A partir de (12), on montre aisément que cette hypothèse revient à supposer qu'à l'équilibre initial, l'élasticité de ε_1 par rapport au prix de l'énergie h est *moins* élevée que l'élasticité de ε_2 par rapport à ce même prix. Dans le cas particulier de fonctions de production Cobb-Douglas ($Y_1 = F\varepsilon_1^\alpha$ et $Y_2 = G\varepsilon_2^\beta$), (28) implique que $\alpha > \beta$.

La troisième hypothèse concerne les dotations en facteurs spécifiques des deux régions V et W . Elle stipule que la région W est abondante dans le facteur spécifique du secteur 1 au sens où :

$$\text{Hypothèse 3 : } \frac{F_W}{G_W} > \frac{F_V}{G_V} \quad (29)$$

Nous énonçons maintenant une série de résultats préliminaires qui seront utiles pour l'analyse des différents scénarios de partage de l'effort de réduction de la pollution.

Lemme 1 : L'Hypothèse 1 (cfr. (26)) relative aux intensités énergétiques des secteurs est équivalente à :

$$\mu_1(\varepsilon_1) = \frac{\varepsilon_1 y_1'(\varepsilon_1)}{y_1(\varepsilon_1)} > \frac{\varepsilon_2 y_2'(\varepsilon_2)}{y_2(\varepsilon_2)} = \mu_2(\varepsilon_2) \quad (30)$$

Démonstration : (13), (14) et (27) conduisent à :

$$\frac{r_F}{h\varepsilon_1} = \frac{y_1(\varepsilon_1)}{\varepsilon_1 y_1'(\varepsilon_1)} - 1 \text{ et } \frac{r_G}{h\varepsilon_2} = \frac{y_2(\varepsilon_2)}{\varepsilon_2 y_2'(\varepsilon_2)} - 1$$

La thèse suppose alors que

$$\begin{aligned} \frac{\varepsilon_1 y_1'(\varepsilon_1)}{y_1(\varepsilon_1)} &= \frac{1}{\frac{r_F}{h\varepsilon_1} + 1} > \frac{1}{\frac{r_G}{h\varepsilon_2} + 1} = \frac{\varepsilon_2 y_2'(\varepsilon_2)}{y_2(\varepsilon_2)} \\ &\Leftrightarrow \frac{r_G}{h\varepsilon_2} > \frac{r_F}{h\varepsilon_1}. \end{aligned}$$

Or l'Hypothèse 1 conduit bien à cette inégalité. En effet, (26) implique que

$$\begin{aligned} hE_1[hE_2 + r_G G] &> hE_2[hE_1 + r_F F] \\ \Leftrightarrow hE_1 r_G G &> hE_2 r_F F \\ \Leftrightarrow \frac{hE_1}{r_F F} &> \frac{hE_2}{r_G G} \\ \Leftrightarrow \frac{h\varepsilon_1}{r_F} &> \frac{h\varepsilon_2}{r_G} \end{aligned}$$

CQFD

Dans le cas de fonctions de production Cobb-Douglas ($Y_1 = F\varepsilon_1^\alpha$ et $Y_2 = G\varepsilon_2^\beta$), (30) implique que $\alpha > \beta$. Dans ce cas particulier, les Hypothèses 1 et 2 conduisent donc à la même condition.

Lemme 2 : A l'origine, les variations du RDR et du RPR en fonction de la fiscalité sur l'énergie et des transferts s'écrivent :

$$dI_j = [\tau + \pi]dE_j \text{ et } dJ_j = dT_j + \tau dE_j + \pi d\bar{E}_j, \quad j = V, W. \quad (31)$$

Démonstration : Concernant le RPR, (21) implique que

$$dI_j = dr_F F_j + dr_G G_j + [\tau + \pi]dE_j + E_j[d\tau + d\pi], \quad j = V, W \quad (32)$$

Substituant (12) dans (13) pour $i = 1$ et après différentiation (avec $dp_1 = 0$), on obtient :

$$dr_F = -p_1 \varepsilon_1 y_1'' d\varepsilon_1 \quad (33)$$

Par ailleurs, la différentiation de (12) conduit à (avec $dq = 0$) :

$$d\tau + d\pi = p_1 y_1'' d\varepsilon_1 \quad (34)$$

De la combinaison des deux équations précédentes, il découle :

$$dr_F = -\varepsilon_1 [d\tau + d\pi] \quad (35)$$

En procédant de façon similaire pour le facteur spécifique G , on obtient

$$dr_G = -\varepsilon_2 [d\tau + d\pi] \quad (36)$$

Comme les élasticités ε_i ($i = 1, 2$) sont positives, il apparaît que les prix des facteurs spécifiques varient en sens inverse de la hausse de la fiscalité sur l'énergie $d\tau + d\pi$. Compte tenu de la définition des consommations énergétiques régionales (cfr. (19)), la substitution de (35) et (36) dans (32) conduit à la première partie de la thèse.

Concernant le RDR, étant donné (24), on a

$$dJ_j = dI_j + dT_j + [\bar{E}_j - E_j]d\pi + \pi[d\bar{E}_j - dE_j], \quad j = V, W$$

Vu la première partie de la thèse et le fait que les variations sont calculées à l'origine (où par hypothèse $\bar{E}_j = E_j$), la deuxième partie découle aussitôt. CQFD

Lemme 3 : A l'équilibre initial, l'énergie consommée par unité de RDR est plus élevée en Région W qu'en Région V :

$$\frac{E_W}{J_W} > \frac{E_V}{J_V} \quad (37)$$

Démonstration : Compte tenu qu'à l'équilibre initial, $J_j = I_j$ ($j = V, W$), de (21) et (19), et posant $A_j = F_j/G_j$ ($j = V, W$), la thèse se réécrit :

$$\frac{\varepsilon_1 A_W + \varepsilon_2}{[r_F + [\tau + \pi]\varepsilon_1]A_W + [r_G + [\tau + \pi]\varepsilon_2]} > \frac{\varepsilon_1 A_V + \varepsilon_2}{[r_F + [\tau + \pi]\varepsilon_1]A_V + [r_G + [\tau + \pi]\varepsilon_2]}$$

ce qui conduit à

$$[A_W - A_V][r_G + [\tau + \pi]\varepsilon_2]\varepsilon_1 > [A_W - A_V][r_F + [\tau + \pi]\varepsilon_1]\varepsilon_2$$

Vu l'Hypothèse 3 sur les dotations régionales de facteurs (cfr. (29)), cette expression se réduit à

$$[r_G + [\tau + \pi]\varepsilon_2]\varepsilon_1 > [r_F + [\tau + \pi]\varepsilon_1]\varepsilon_2 \quad (38)$$

ou encore à

$$r_G \varepsilon_1 > r_F \varepsilon_2$$

Divisant de part et d'autre par $q + \tau + \pi$, et utilisant (13) et (14), on a :

$$\frac{y_2(\varepsilon_2)}{\varepsilon_2 y_2'(\varepsilon_2)} - 1 > \frac{y_1(\varepsilon_1)}{\varepsilon_1 y_1'(\varepsilon_1)} - 1$$

ou encore

$$\mu_1(\varepsilon_1) > \mu_2(\varepsilon_2)$$

Or cette inégalité est bien vérifiée d'après le lemme 1. CQFD

Lemme 4 : Les variations des consommations énergétiques régionales en fonction de la fiscalité sur l'énergie s'écrivent :

$$dE_j = \left[\frac{F_j}{p_1 y_1''(\varepsilon_1)} + \frac{G_j}{p_2 y_2''(\varepsilon_2)} \right] dh = B_j dh, \quad j = V, W \quad (39)$$

la deuxième égalité définissant B_j ($j = V, W$). De même, sur le plan national :

$$dE = \left[\frac{F}{p_1 y_1''(\varepsilon_1)} + \frac{G}{p_2 y_2''(\varepsilon_2)} \right] dh = B dh \quad (40)$$

où $F = \sum_j F_j$ et $G = \sum_j G_j$ sont les dotations nationales de facteurs spécifiques et par définition $B = \sum_j B_j$.

Démonstration : (39) s'obtient immédiatement après différentiation de (19) et substitution des différentielles des intensités énergétiques $d\varepsilon_1$ et $d\varepsilon_2$ grâce à (34) (où $dh = d\tau + d\pi$). Vu la linéarité des variations des consommations énergétiques régionales en les dotations de facteurs spécifiques, (40) découle aussitôt. CQFD

Les coefficients B et B_j , qui mesurent la sensibilité des consommations énergétiques nationale et régionales à la fiscalité sur l'énergie, sont négatifs en vertu de la concavité des fonctions y_1 et y_2 . Les consommations énergétiques évoluent donc bien en sens inverse du prix de l'énergie.

4 Impacts dans un cadre national

On suppose donné un objectif *national* de réduction des émissions pour le pays $dE/E = K$, où K est une constante exogène négative. Dans la présente section, on envisage différents scénarios de partage de l'effort de réduction dans un cadre strictement national, autrement dit en l'absence d'un marché de permis international. La fiscalité sur l'énergie se limite donc à une taxe, et l'équilibre initial où se calcule l'impact de ces scénarios est décrit par les équations (12) à (25), avec $\pi = 0$.

Dans ce contexte, le Lemme 2 (cfr. (31)) qui donne les variations des RDR en fonction des variables dont ces grandeurs dépendent conduit à

$$dJ_j = dT_j + \tau dE_j, \quad j = V, W. \quad (41)$$

La présence de dT_j dans cette dernière expression indique que si l'origine se caractérise (par hypothèse) par l'absence de transferts, l'effort de réduction proprement dit peut, quant à lui, s'accompagner de transferts interrégionaux.

4.1 Scénario de réduction proportionnelle (P)

Pour remplir l'objectif national, le scénario **P** implique :

- (i) une réduction proportionnelle des émissions à travers les régions;
- (ii) que chaque région assume elle-même la part de l'effort qui lui incombe, autrement dit l'effort de réduction se réalise sans transferts entre régions.

Formellement, le scénario **P** impose que

$$\frac{dE_j}{E_j} = K, \quad j = V, W \quad (42)$$

et que $dT_W = dT_V = 0$. De (41), il découle par conséquent que

$$\frac{dJ_j}{J_j} = \tau \frac{KE_j}{J_j}, \quad j = V, W \quad (43)$$

On en déduit alors la proposition suivante :

*Proposition 1 : Selon le scénario **P**, les diminutions des RDR suite à l'objectif national de réduction des émissions $dE/E = K$ seront telles que*

$$\frac{dJ_W}{J_W} < \frac{dJ_V}{J_V} < 0$$

Démonstration : Comme K est négatif, la thèse suppose que $\frac{E_W}{J_W} > \frac{E_V}{J_V} > 0$. Or cette dernière inégalité est bien vérifiée en vertu du Lemme 3. CQFD

Bien qu'il prévoit une réduction proportionnelle des émissions entre les régions, le scénario **P** se révèle donc plus défavorable pour la région W que pour la région V . Une réduction proportionnelle des émissions *ne conduit donc pas* à une réduction proportionnelle des RDR.

Le scénario **P** suppose une hausse de la fiscalité sur l'énergie différente au sein de chaque région. En effet, l'inversion de (39) conduit à :

$$d\tau_j = \frac{KE_j}{\frac{F_j}{p_1 y_1^s(\varepsilon_1)} + \frac{G_j}{p_2 y_2^s(\varepsilon_2)}} = \frac{KE_j}{B_j}, \quad j = V, W \quad (44)$$

Il en découle alors la proposition suivante :

*Proposition 2 : En l'absence de marché international de permis, l'augmentation de la taxe sur l'énergie induite par le scénario **P** est plus forte pour la région W que pour la région V .*

Démonstration : Vu (44), la thèse se réécrit :

$$d\tau_W = \frac{KE_W}{\frac{F_W}{p_1 y_1^s(\varepsilon_1)} + \frac{G_W}{p_2 y_2^s(\varepsilon_2)}} > \frac{KE_V}{\frac{F_V}{p_1 y_1^s(\varepsilon_1)} + \frac{G_V}{p_2 y_2^s(\varepsilon_2)}} = d\tau_V \quad (45)$$

Compte tenu de (19) et posant $A_j = F_j/G_j$ ($j = V, W$), l'inégalité précédente devient après simplification (pour mémoire, K est négatif) :

$$\frac{\varepsilon_1 A_V + \varepsilon_2}{\frac{A_V}{p_1 y_1^s(\varepsilon_1)} + \frac{1}{p_2 y_2^s(\varepsilon_2)}} > \frac{\varepsilon_1 A_W + \varepsilon_2}{\frac{A_W}{p_1 y_1^s(\varepsilon_1)} + \frac{1}{p_2 y_2^s(\varepsilon_2)}}$$

Après quelques calculs, et en particulier utilisation de l'Hypothèse 3 relative aux dotations régionales de facteurs ($A_W > A_V$), il découle que

$$p_2 \varepsilon_2 y_2''(\varepsilon_2) < p_1 \varepsilon_1 y_1''(\varepsilon_1)$$

La thèse découle alors immédiatement de (12) et de l'Hypothèse 2. CQFD

Il importe de souligner que le scénario **P** est inefficace sur le plan national au sens où, comme le suggère clairement (45), les coûts marginaux de réduction des émissions ne sont pas égaux entre régions (partant d'un niveau identique, la taxe sur l'énergie devient plus élevée en Région W).

4.2 Scénario de réduction optimal (O)

On suppose le même objectif national de réduction des émissions que précédemment : $dE/E = K$ ($K < 0$). Le scénario **O** prévoit

- (i) une hausse de la taxation sur l'énergie commune aux deux régions permettant d'atteindre l'objectif national au moindre coût;
- (ii) que chaque région assume elle-même la part de l'effort optimal qui lui incombe (pas de transferts entre régions).

Ce scénario **O** est qualifié d'optimal au sens où les coûts marginaux de réduction des émissions s'égalisent entre régions (partant d'un niveau commun, la hausse de la taxe est la même pour les deux régions). Dans ce cas :

Proposition 3 : L'augmentation de la taxe sur l'énergie induite par une réduction des émissions $dE/E = K$ est donnée par

$$d\tau = \frac{KE}{\frac{F}{p_1 y_1''(\varepsilon_1)} + \frac{G}{p_2 y_2''(\varepsilon_2)}} = \frac{KE}{B} \quad (46)$$

Démonstration : Ce résultat s'obtient immédiatement de l'inversion de (40) et du fait que l'effort de réduction national implique que $dE = KE$. CQFD

Vu (39) et (46), les variations des consommations énergétiques (ou des émissions) régionales s'écrivent :

$$dE_j = \frac{\frac{F_j}{p_1 y_1''(\varepsilon_1)} + \frac{G_j}{p_2 y_2''(\varepsilon_2)}}{\frac{F}{p_1 y_1''(\varepsilon_1)} + \frac{G}{p_2 y_2''(\varepsilon_2)}} KE = \frac{B_j}{B} KE, \quad j = V, W \quad (47)$$

On a alors le résultat suivant :

Lemme 5 : L'Hypothèse 2 sur les fonctions de production (cfr. (28)) implique que :

$$\frac{B_W}{E_W} < \frac{B_V}{E_V} < 0 \quad (48)$$

Démonstration : La deuxième inégalité découle du fait que les quantités B_j sont négatives (les dérivées secondes des fonctions de production y_i ($i = 1, 2$) sont négatives). Vu les définitions des quantités B_j et E_j (cfr. (47) et (19)), la thèse peut se réécrire :

$$\frac{\frac{F_W}{p_1 |y_1''(\varepsilon_1)|} + \frac{G_W}{p_2 |y_2''(\varepsilon_2)|}}{\varepsilon_1 F_W + \varepsilon_2 G_W} > \frac{\frac{F_V}{p_1 |y_1''(\varepsilon_1)|} + \frac{G_V}{p_2 |y_2''(\varepsilon_2)|}}{\varepsilon_1 F_V + \varepsilon_2 G_V}$$

Posant $A_j = F_j/G_j$ ($j = V, W$), l'inégalité précédente devient :

$$\left[\frac{A_W}{p_1 |y_1''(\varepsilon_1)|} + \frac{1}{p_2 |y_2''(\varepsilon_2)|} \right] [\varepsilon_1 A_V + \varepsilon_2] > \left[\frac{A_V}{p_1 |y_1''(\varepsilon_1)|} + \frac{1}{p_2 |y_2''(\varepsilon_2)|} \right] [\varepsilon_1 A_W + \varepsilon_2]$$

Après simplification, on obtient :

$$[A_W - A_V] \frac{\varepsilon_2}{p_1 |y_1''(\varepsilon_1)|} > [A_W - A_V] \frac{\varepsilon_1}{p_2 |y_2''(\varepsilon_2)|}$$

Etant donné l'Hypothèse 3 relative aux dotations régionales de facteurs ($A_W > A_V$), il découle que

$$\frac{\varepsilon_2}{p_1 |y_1''(\varepsilon_1)|} > \frac{\varepsilon_1}{p_2 |y_2''(\varepsilon_2)|}$$

Combinant ce qui précède et (12) de façon à substituer les prix, on obtient

$$\frac{\varepsilon_2 |y_2''(\varepsilon_2)|}{y_2'(\varepsilon_2)} > \frac{\varepsilon_1 |y_1''(\varepsilon_1)|}{y_1'(\varepsilon_1)}$$

Or cette dernière inégalité est vraie en vertu de l' Hypothèse 2 (cfr. (28)). CQFD

On en déduit la proposition suivante :

*Proposition 4 : Selon le scénario **O**, les diminutions des RDR induites par l'objectif national des réduction des émissions $dE/E = K$ sont telles que*

$$\frac{dJ_W}{J_W} < \frac{dJ_V}{J_V} < 0$$

Démonstration : Etant donné (41) et (47), la thèse peut se réécrire :

$$\tau \frac{dE_W}{J_W} = \tau \frac{KE}{B} \frac{B_W}{J_W} < \tau \frac{KE}{B} \frac{B_V}{J_V} = \tau \frac{dE_V}{J_V}$$

Après simplification, on a

$$\frac{|B_W|}{J_W} = \frac{|B_W|}{E_W} \frac{E_W}{J_W} > \frac{|B_V|}{E_V} \frac{E_V}{J_V} = \frac{|B_V|}{J_V} \quad (49)$$

Or cette dernière inégalité est vraie en vertu des Lemmes 3 et 5 (cfr. (37) et 48). CQFD

Tout comme le scénario **P**, le scénario **O** se révèle donc plus défavorable pour la région W que pour la région V . Ce constat suggère que l'impact de l'objectif national de réduction des émissions en termes de perte de RDR est plus marqué pour la région W parce que la valeur ajoutée du secteur 1 (caractérisée par le facteur spécifique F dont W est relativement mieux dotée) est plus sensible au renchérissement du prix de l'énergie que celle du secteur 2. En annexe, on montre formellement via une analyse en termes d'impact sur les secteurs qu'il en est bien ainsi, ce qui permet *in fine* de retrouver la Proposition 4 par une autre voie.

La comparaison des impacts des deux scénarios montre cependant que le scénario **P** est moins défavorable pour la région W que le scénario **O**. Au contraire, la région V est moins affectée par le scénario **O** que par le scénario **P**. On a en effet la proposition suivante :

*Proposition 5 : Le scénario **P** est plus favorable que le scénario **O** pour la région W . Le contraire vaut pour la région V .*

Démonstration : Selon le scénario **P**, la variation du RDR de la région W s'écrit (cfr. (43)) :

$$\left(\frac{dJ_W}{J_W}\right)_{\mathbf{P}} = \tau \frac{KE_W}{J_W}$$

tandis que selon le scénario **O** :

$$\left(\frac{dJ_W}{J_W}\right)_{\mathbf{O}} = \tau \frac{KE}{B} \frac{B_W}{J_W} \quad (50)$$

Du Lemme 5 (cfr. (48)), il découle que

$$\frac{|B_W|}{E_W} > \frac{|B_W| + |B_V|}{E_W + E_V} = \frac{|B|}{E} > \frac{|B_V|}{E_V}$$

ce qui implique immédiatement que

$$\left(\frac{dJ_W}{J_W}\right)_{\mathbf{O}} < \left(\frac{dJ_W}{J_W}\right)_{\mathbf{P}} < 0$$

Par un raisonnement similaire, on obtient pour la région V :

$$\left(\frac{dJ_V}{J_V}\right)_{\mathbf{P}} < \left(\frac{dJ_V}{J_V}\right)_{\mathbf{O}} < 0$$

CQFD.

4.3 Scénarios d'égal sacrifice

4.3.1 Un scénario avec transferts

Un premier scénario d'égal sacrifice (dit scénario **E**) reprend l'idée d'une hausse commune de la taxe, mais prévoit un transfert entre régions de façon à égaliser les variations de RDR suite à l'effort de réduction national. Il reprend donc le point (i) du scénario **O**, mais s'en démarque au niveau du point (ii).

Le scénario **E** stipule donc un transfert interrégional dT accompagnant l'effort de réduction tel que

$$\left(\frac{dJ_W}{J_W}\right)_{\mathbf{E}} = \left(\frac{dJ_W}{J_W}\right)_{\mathbf{O}} + dT = \left(\frac{dJ_V}{J_V}\right)_{\mathbf{O}} - dT = \left(\frac{dJ_V}{J_V}\right)_{\mathbf{E}}$$

Comme $\left(\frac{dJ_j}{J_j}\right)_{\mathbf{O}} = \tau \frac{KE}{B} \frac{B_j}{J_j}$, le transfert s'écrit :

$$dT = \tau \frac{KE}{B} \left[\frac{B_V}{J_V} - \frac{B_W}{J_W} \right] \quad (51)$$

Cette dernière quantité est positive en vertu du Lemme 5 (cfr. (48)). Le transfert va donc bien de la Région V vers la Région W . Il sera d'autant plus grand que l'objectif de réduction ($|KE|$) est ambitieux et que les régions sont différemment affectées par la hausse de la taxation (ce que mesure le terme entre crochets).

4.3.2 Un scénario sans transfert

Dans un contexte national, il est possible de répartir l'effort de réduction des émissions entre secteurs d'activité de façon à réaliser l'objectif national de réduction tout en égalisant les variations relatives de RDR *sans* transferts interrégionaux. L'idée à la base de ce nouveau scénario, dit "sectoriel" (**S**), est d'augmenter la fiscalité sur l'énergie différemment selon les secteurs.

Soient $d\tau_1$ et $d\tau_2$ les hausses respectives de la fiscalité dans les secteurs 1 et 2. Par différentiation de (17) et (12) (avec $dq = d\pi = 0$), ces hausses se traduisent par des diminutions d'émissions du secteur 1 et du secteur 2 dans la Région j respectivement égales à $dE_{j1} = F_j d\tau_1 / p_1 y_1''$ et $dE_{j2} = G_j d\tau_2 / p_2 y_2''$. La baisse des émissions sur le plan national vaut par conséquent $dE = [F_W + F_V] d\tau_1 / p_1 y_1'' + [G_W + G_V] d\tau_2 / p_2 y_2''$. Il faut que cette baisse des émissions corresponde à l'objectif national de réduction. Il importe donc que :

$$\frac{[F_W + F_V] d\tau_1}{p_1 y_1''} + \frac{[G_W + G_V] d\tau_2}{p_2 y_2''} = K E$$

Par ailleurs, le scénario **S** stipule que les variations de RDR soient égales, et ce, en l'absence de transferts. Etant donné (41), ceci implique que :

$$\frac{dJ_W}{J_W} = \frac{\tau dE_W}{J_W} = \frac{\tau}{J_W} \left[\frac{F_W d\tau_1}{p_1 y_1''} + \frac{G_W d\tau_2}{p_2 y_2''} \right] = \frac{\tau}{J_V} \left[\frac{F_V d\tau_1}{p_1 y_1''} + \frac{G_V d\tau_2}{p_2 y_2''} \right] = \frac{\tau dE_V}{J_V} = \frac{dJ_V}{J_V}$$

Les deux équations précédentes forment un système qui permet d'identifier les inconnues $d\tau_1$ et $d\tau_2$.

Le scénario **S** appelle quelques remarques. Primo, le fait que les baisses relatives de RDR soient égales, et ce, sans transferts interrégionaux, devrait être bien accueilli par les régions. Cependant, des réactions défavorables pourraient survenir des représentants du secteur subissant la plus forte hausse de la fiscalité énergétique, c'est-à-dire du secteur 2¹⁰. En outre, le scénario **S** présente le désavantage d'être inefficace puisque les coûts marginaux de réduction ne s'égalisent pas entre secteurs.

5 Impacts dans un cadre international

On suppose que l'objectif national de réduction des émissions pour le pays ($dE/E = K < 0$) prend cette fois place dans un cadre international (à l'image du Protocole de Kyoto par exemple), qui prévoit un marché international de permis. On réenvisage les différents scénarios de partage de l'effort de la section précédente dans ce nouveau cadre. Mais cette fois, c'est le prix des permis π qui varie, et ce de façon exogène (le pays est supposé price-taker), tandis que le niveau de taxation reste constant ($d\tau = 0$). Si les régions n'ont plus le pouvoir de déterminer (conjointement ou non) la variation de la fiscalité leur permettant d'ajuster leurs émissions à l'objectif national, elles ont maintenant la possibilité d'acheter ou de vendre des permis sur le marché international. Ces échanges de permis seront les seuls transferts envisagés par la suite (ce qui suppose $dT_j = 0$).

¹⁰On peut en effet montrer que $d\tau_1 < d\tau_2$. Utilisant (21) et (19) (avec $\pi = 0$ et le fait que $I_j = J_j$) et par un raisonnement similaire à celui du Lemme 3, on montre d'abord que $F_V/J_V < F_W/J_W$ et $G_W/J_W < G_V/J_V$. Il en découle que le déterminant du système d'équations en $d\tau_1$ et $d\tau_2$ est négatif. Or KE l'est aussi. Montrer que $d\tau_1 < d\tau_2$ revient alors à montrer que

$$\frac{G_W/J_W - G_V/J_V}{p_2 y_2''} < \frac{F_W/J_W - F_V/J_V}{p_1 y_1''}$$

ou encore, étant donnée la définition des coefficients B_j (cfr. (39)), que $B_W/J_W < B_V/J_V$, ce qui est vrai en vertu des Lemmes 3 et 5.

Vu ce qui précède et le Lemme 2 (cfr. (31)), la variation des RDR s'écrit dans ce nouveau contexte :

$$dJ_j = \tau dE_j + \pi d\bar{E}_j, \quad j = V, W \quad (52)$$

5.1 Scénario de réduction proportionnelle (P)

Replacé dans le nouveau contexte d'un marché de permis international, le scénario **P** suppose une réduction proportionnelle des dotations de permis à travers les régions :

$$\frac{d\bar{E}_j}{\bar{E}_j} = K, \quad j = V, W \quad (53)$$

Comme les échanges de permis sont possibles, la réduction porte sur les dotations de permis, et non plus, comme dans le cadre national, sur les émissions proprement dites (cfr. (42)).

Etant donné le Lemme 4 (cfr. (39) avec $dh = d\pi$), on a $dE_j = B_j d\pi$. Cette dernière égalité et (53) impliquent que (52) peut se réécrire :

$$\frac{dJ_j}{J_j} = \left[\tau \frac{B_j}{E_j} d\pi + \pi K \right] \frac{E_j}{J_j}, \quad j = V, W \quad (54)$$

En vertu du Lemme 5 (cfr. (48)) qui implique que $\frac{B_W}{E_W} < \frac{B_V}{E_V} (< 0)$, et du Lemme 3 (cfr. (37)) qui stipule que $\frac{E_W}{J_W} > \frac{E_V}{J_V} (> 0)$, il découle que $\frac{dJ_W}{J_W} < \frac{dJ_V}{J_V} < 0$. On retrouve donc le résultat de la Proposition 1 : bien qu'il prévoit une réduction proportionnelle des dotations de permis identiques pour les deux régions, le scénario **P** se révèle plus défavorable pour la région W que pour la région V .

Partant d'un équilibre initial où $\bar{E}_j = E_j$ ($j = V, W$), la quantité de permis échangés par la Région j induite par le scénario **P** est, étant donné ce qui précède, égale à $dE_j - d\bar{E}_j = B_j d\pi - K \bar{E}_j$. Plus $d\pi$ est faible, plus la réduction des émissions de la Région j est faible et plus celle-ci est amenée à acquérir des permis sur le marché pour remplir ses engagements (plus $dE_j - d\bar{E}_j$ est positif).

Par ailleurs, il importe de souligner que, contrairement à la situation qui prévalait dans le cadre national (marché international de permis inexistant), le scénario **P** est maintenant efficace puisque les coûts marginaux de réduction des émissions s'égalisent entre régions.

5.2 Scénario de réduction optimal (O)

En présence d'un marché de permis international, le scénario **O** ne se distingue du précédent qu'au niveau des variations de dotations de permis affectées aux régions suite à l'effort de réduction. On postule que ces variations de dotations sont égales aux variations des consommations énergétiques régionales que l'on *observerait* en l'absence d'un marché de permis international, autrement dit telles que déterminées par (47). On suppose par conséquent que

$$d\bar{E}_j = \frac{B_j}{B} K E, \quad j = V, W \quad (55)$$

Etant donné (39) (avec $dh = d\pi$) et (55), (52) peut se réécrire :

$$\frac{dJ_j}{J_j} = \left[\tau d\pi + \pi \frac{KE}{B} \right] \frac{B_j}{E_j} \frac{E_j}{J_j}, \quad j = V, W \quad (56)$$

Le terme entre crochets étant positif, vu les Lemmes 3 et 5, on vérifie à nouveau que $\frac{dJ_W}{J_W} < \frac{dJ_V}{J_V} < 0$. On retrouve le résultat de la Proposition 4, à savoir que le scénario **O** se révèle plus défavorable pour la région W que pour la région V .

En comparant (54) et (56), et en réappliquant le raisonnement à la base de la démonstration de la Proposition 5, on retrouve le résultat de cette proposition, à savoir que le scénario **P** est moins défavorable pour la région W que le scénario **O**, au contraire de la région V qui est moins affectée par le scénario **O** que par le scénario **P**.

5.3 Scénario d'égal sacrifice

Nous ne réenvisagerons ici que le scénario d'égal sacrifice avec transfert¹¹. La somme des variations de dotations régionales en permis doit être égale à l'effort national de réduction des émissions :

$$d\bar{E}_W + d\bar{E}_V = KE \quad (57)$$

Le scénario **E** stipule que les variations relatives des RDR doivent être égales. Etant donné (39) (avec $dh = d\pi$) et (52), cela suppose que

$$\frac{dJ_W}{J_W} = \tau \frac{B_W}{J_W} d\pi + \pi \frac{d\bar{E}_W}{J_W} = \tau \frac{B_V}{J_V} d\pi + \pi \frac{d\bar{E}_V}{J_V} = \frac{dJ_V}{J_V} \quad (58)$$

Les deux équations précédentes permettent de calculer les réductions de dotations en permis $d\bar{E}_W$ et $d\bar{E}_V$. La solution du système s'écrit :

$$d\bar{E}_j = \frac{J_j}{J} KE + S_j \frac{J_V J_W}{J} \left[\frac{B_V}{J_V} - \frac{B_W}{J_W} \right] \frac{\tau d\pi}{\pi}, \quad j = V, W$$

où par définition, $S_W = 1$ et $S_V = -1$. Par rapport à un partage des réductions de dotations simplement proportionnel à la part des RDR dans le Revenu National (le premier terme), le scénario **E** prévoit un partage plus favorable à la Région W , le deuxième terme ayant le même signe que S_j en vertu des Lemmes 3 et 5 (cfr (37) et (48)).

6 Conclusion

En guise de conclusion, nous résumons les principaux résultats obtenus, en particulier au niveau de la comparaison des impacts des différents scénarios de réduction des émissions envisagés sur les RDR. L'analyse a montré que le scénario de *réduction proportionnelle* (**P**) et le scénario de *réduction optimale* (**O**) se traduisent par une baisse de RDR plus forte pour la région spécialisée dans le secteur le plus intensif en énergie (la Région W), car la production de ce secteur (caractérisé par le facteur spécifique dont W est relativement mieux dotée) est plus sensible à l'augmentation du prix de l'énergie que celle de l'autre secteur. Le scénario **P** est cependant moins défavorable pour la Région W que le scénario **O**, le contraire étant vrai pour la Région V . Replacée dans le contexte belge, cette observation explique les positions de principe respectives des régions wallonne et flamande, la première étant plutôt partisane du scénario **P**, la seconde du scénario **O**.

Contrairement aux deux précédents, les scénarios d'*égal sacrifice* (**E** et **S**) impliquent par construction une baisse relative du RDR identique pour les deux régions. Le premier prévoit

¹¹Le scénario **S** ne peut être réenvisagé ici, car il suppose une différenciation de la fiscalité sur l'énergie selon les secteurs. Ceci n'est pas possible dans un cadre où le renchérissement de l'énergie se traduit uniquement par une augmentation du prix des permis sur un marché international (pour mémoire, le niveau de la taxe τ est ici supposé constant).

un transfert compensateur de la Région *V* vers la Région *W*. Le deuxième suppose quant à lui une hausse de la fiscalité énergétique différente selon les secteurs, qui permet le même sacrifice (en termes relatifs) de la part des régions, sans que des transferts interrégionaux ne soient nécessaires.

Les résultats qui précèdent sont indépendants de l'existence ou non d'un marché international de permis négociables (à l'exception du scénario **S**), dans un contexte où les scénarios s'expriment en termes de réduction de dotations de permis et non plus en termes de réduction d'émissions. On observe en particulier qu'une diminution proportionnelle des dotations régionales de permis ne se traduit pas par une diminution proportionnelle des RDR. Ce résultat constitue un exemple de biais possible d'une politique de réduction de la pollution fondée exclusivement sur un critère de partage de la charge en termes d'allocation de permis.

Il apparaît aussi que dans le cadre du présent modèle, il n'est pas possible de concevoir un scénario qui soit *à la fois* efficace, équitable (au sens d'*égal sacrifice*) et sans transferts interrégionaux. Ce résultat est dû à l'existence de facteurs de production spécifiques aux secteurs d'activité. Nous nous démarquons sur ce point de Copeland et Taylor (2003) qui, dans le cadre d'un modèle à la Hecksher-Ohlin, montrent qu'il peut exister une infinité de manières efficaces de réduire les émissions polluantes, ce qui permet de concilier critères d'équité et d'efficacité même en l'absence d'un marché de permis.

Les résultats obtenus l'ont été dans le cadre d'une petite économie ouverte, price-taker sur les marchés internationaux. Une extension intéressante serait d'en examiner la robustesse dans le contexte d'un pays susceptible de répercuter sur les prix de ses produits tout ou partie de l'accroissement de ses coûts de production induit par la réduction de ses émissions polluantes.

7 Bibliographie

Antweiler A., B. Copeland et M. S. Taylor (2001). Is free trade good for the environment ?, *The American Economic Review*, 91, 877-908.

Batabyal A. et H. Beladi (Eds.) (2001). *The economics of international trade and the environment*, Lewis Publishers.

Chander P. et M. A. Khan (1998). International treaties on trade and global pollution, CLIMNEG working paper n°11, Université catholique de Louvain.

Copeland B. et M. S. Taylor (2003). Free trade and global warming : A trade theory view of the Kyoto Protocol, NBER discussion paper n°7657 (version actualisée février 2003).

Copeland B. et M. S. Taylor (2001). International trade and the environment : A framework for analysis, NBER discussion paper n°8540.

GAM (Groupe d'analyse et de modélisation) (2002). Guide des hypothèses et de la méthodologie utilisées pour obtenir les résultats du GAM, miméo, mai 2002.

Groenenberg H., D. Phylipsen et K. Blok (2001). Differentiating commitments world wide : global differentiation of GHG emissions reductions based on the Triptych approach - a preliminary assessment, *Energy Policy*, 29, 1007-1030.

Nolet J. et M. Blais (2002). Incidences de l'approche fédérale sur le secteur industriel, *Options Politiques/Policy Options*, Décembre 2002 - Janvier 2003, 40-44.

Phylipsen G., J. Bode, K. Blok, H. Merkus et B. Metz (1998). A Triptych sectoral approach to burden differentiation; GHG emissions in the European bubble, *Energy Policy*, 26, 929-943.

PricewaterhouseCoopers (2002). Onderzoek scenario's nationale verdeling Kyoto-verbintenissen, rapport de recherche, Décembre 2002.

Rose A., B. Stevens, J. Edmonds et M. Wise (1998). International equity and differentiation in global warming policy, *Environmental and Resource Economics*, 12, 25-51.

8 Annexe : Une approche sectorielle

L'analyse des sections précédentes en termes d'impacts sur les RDR peut être utilement complétée par une analyse en termes d'impact sur les secteurs. Un premier résultat se résume dans la proposition suivante¹² :

Proposition A.1 : La part dans le RPR du secteur 1 est supérieure pour la région W par rapport à la région V, autrement dit :

$$\frac{VA_{W1}}{I_W} = \frac{[r_F + \tau\varepsilon_1]F_W}{I_W} > \frac{[r_F + \tau\varepsilon_1]F_V}{I_V} = \frac{VA_{V1}}{I_V}$$

tandis que la part dans le RPR du secteur 2 est inférieure pour la région W par rapport à la région V :

$$\frac{VA_{W2}}{I_W} = \frac{[r_G + \tau\varepsilon_2]G_W}{I_W} < \frac{[r_G + \tau\varepsilon_2]G_V}{I_V} = \frac{VA_{V2}}{I_V}$$

où par définition VA_{ji} est la valeur ajoutée du secteur i dans la région j .

Démonstration : Compte tenu de (8), (21) et (19) (avec $\pi = 0$), la part de la valeur ajoutée du secteur 1 dans le RPR de la région j s'écrit $[r_F F_j + \tau E_{j1}] / I_j = [r_F + \tau\varepsilon_1] F_j / I_j$. La part de la valeur ajoutée du secteur 2 dans le RPR de la région j s'écrit quant à elle $[r_G G_j + \tau E_{j2}] / I_j = [r_G + \tau\varepsilon_2] G_j / I_j$. L'Hypothèse 3 sur les dotations régionales de facteurs implique que

$$\begin{aligned} \frac{[r_F + \tau\varepsilon_1]F_W}{[r_F + \tau\varepsilon_1]F_V} &> \frac{[r_G + \tau\varepsilon_2]G_W}{[r_G + \tau\varepsilon_2]G_V} \\ \Rightarrow \frac{[r_F + \tau\varepsilon_1]F_W}{[r_F + \tau\varepsilon_1]F_V} &> \frac{[r_F + \tau\varepsilon_1]F_W + [r_G + \tau\varepsilon_2]G_W}{[r_F + \tau\varepsilon_1]F_V + [r_G + \tau\varepsilon_2]G_V} = \frac{I_W}{I_V} > \frac{[r_G + \tau\varepsilon_2]G_W}{[r_G + \tau\varepsilon_2]G_V} \\ \Rightarrow &\text{thèse} \end{aligned}$$

CQFD

L'effet d'une hausse de la taxe sur l'énergie est plus sensible pour le secteur 1, plus intensif en énergie. Plus précisément :

¹²Pour mémoire, l'effort de réduction se réalise dans un cadre strictement national, autrement dit en l'absence d'un marché permis international (et donc $\pi = d\pi = 0$).

Proposition A.2 : Suite à une hausse $d\tau$ de la taxe induite par l'effort de réduction des émissions, les variations de valeurs ajoutées sectorielles seront telles que :

$$\frac{dVA_{j1}}{VA_{j1}} < \frac{dVA_{j2}}{VA_{j2}} < 0$$

Démonstration : Par définition, $VA_{j1} = [r_F + \tau\varepsilon_1]F_j$ et $VA_{j2} = [r_G + \tau\varepsilon_2]G_j$. La différentiation de ces deux expressions conduit à :

$$\frac{dVA_{j1}}{VA_{j1}} = \frac{\tau}{r_F + \tau\varepsilon_1} \frac{d\tau}{p_1 y_1''} \text{ et } \frac{dVA_{j2}}{VA_{j2}} = \frac{\tau}{r_G + \tau\varepsilon_2} \frac{d\tau}{p_2 y_2''} \quad (59)$$

La thèse suppose alors que

$$[r_G + \tau\varepsilon_2]p_2|y_2''| > [r_F + \tau\varepsilon_1]p_1|y_1''| > 0$$

Toutes les quantités étant positives, la deuxième inégalité est vraie. Compte tenu de (10), et en multipliant de part et d'autre par $\varepsilon_1\varepsilon_2$, la première inégalité peut se réécrire :

$$[r_G + \tau\varepsilon_2]\varepsilon_1 \frac{\varepsilon_2|y_2''|}{y_2'} > [r_F + \tau\varepsilon_1]\varepsilon_2 \frac{\varepsilon_1|y_1''|}{y_1'}$$

Or cette inégalité est bien vérifiée en vertu du Lemme 3 (cfr. (38) avec $\pi = 0$) et de l'Hypothèse 2 (cfr. (28)). CQFD

L'expression (59) fait apparaître que les variations relatives de valeurs ajoutées sectorielles dVA_{ji}/VA_{ji} induites par une variation $d\tau$ ne dépendent pas de j , ce qui implique $dVA_{ji}/VA_{ji} = dVA_i/VA_i$, $j = V, W$. L'effet sur les RPR (égaux ici aux RDR) n'est cependant pas identique car le partage de la valeur ajoutée entre secteurs change selon la région, suite à des dotations relatives dans les facteurs F et G différentes. Formellement :

$$\frac{dI_j}{I_j} = \frac{dVA_1}{VA_1} \frac{VA_{j1}}{I_j} + \frac{dVA_2}{VA_2} \frac{VA_{j2}}{I_j}, j = V, W$$

Etant données les deux propositions précédentes, on peut montrer que :

Proposition A.3 : Suite à une augmentation $d\tau$ de la taxe, la diminution relative du RPR de la région W sera plus forte que celle du RPR de la région V .

Démonstration : La thèse revient à montrer que

$$\frac{dI_W}{I_W} = \frac{dVA_1}{VA_1} \frac{VA_{W1}}{I_W} + \frac{dVA_2}{VA_2} \frac{VA_{W2}}{I_W} < \frac{dVA_1}{VA_1} \frac{VA_{V1}}{I_V} + \frac{dVA_2}{VA_2} \frac{VA_{V2}}{I_V} = \frac{dI_V}{I_V} < 0$$

La deuxième inégalité découle de la Proposition A.2. La première inégalité revient à

$$\frac{dVA_1}{VA_1} \left[\frac{VA_{W1}}{I_W} - \frac{VA_{V1}}{I_V} \right] < \frac{dVA_2}{VA_2} \left[\frac{VA_{V2}}{I_V} - \frac{VA_{W2}}{I_W} \right] \quad (60)$$

Or

$$\frac{VA_{W1}}{I_W} + \frac{VA_{W2}}{I_W} = \frac{VA_{V1}}{I_V} + \frac{VA_{V2}}{I_V} = 1$$

ou encore

$$\frac{VA_{W1}}{I_W} - \frac{VA_{V1}}{I_V} = \frac{VA_{V2}}{I_V} - \frac{VA_{W2}}{I_W}$$

L'inégalité (60) se réduit donc à $\frac{dVA_1}{VA_1} < \frac{dVA_2}{VA_2}$, ce qui est vrai en vertu de la Proposition A.2. CQFD

On retrouve donc le résultat de la Proposition 4 puisqu'on se trouve dans un contexte où RDR et RPR se confondent (absence de transferts à l'origine).