

# **Une Analyse Economique du Marché du Carbone<sup>1</sup>**

**Gilles Grandjean**

Mars 2004

Chaire Lhoist Berghmans Entreprise, Economie, Environnement  
Center for Operations Research & Econometrics (CORE)  
Université Catholique de Louvain

Projet de recherche financé par les Services Fédéraux des Affaires Scientifiques,  
Techniques et Culturelles « Le Mécanisme pour un Développement Propre,  
Conception d'outils et mise en œuvre » (CP-F5-261)

---

<sup>1</sup> Cette note a été présentée au Comité d'Utilisateur en juin 2003. la présente version tient compte des remarques émises par les participants

# 1. Introduction

Le protocole de Kyoto contraint les pays développés (annexe B) à limiter leurs émissions de six gaz à effet de serre ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{FS}_6$ , PFCs et HFCs) durant la période 2008-2012. Ces objectifs peuvent être atteints par le biais de politiques de réductions domestiques ou en ayant recours aux mécanismes de flexibilité définis dans le protocole. L'achat de permis d'émission, l'utilisation de crédits issus de projets d'Application Conjointe (AC) ou de projets de Mécanisme pour un Développement Propre (MDP) permettent en effet aux pays signataires de combler la différence entre leur objectif de réduction et leur réduction effective en première période d'engagement.<sup>2</sup>

Depuis le travail de Ellerman, Decaux (1998), nombreuses ont été les études qui ont pour objectif de déterminer la structure des échanges dans le marché international naissant des titres carbone, et de quantifier le coût de la réduction de gaz à effet de serre supporté par les différents pays qui participent au Protocole de Kyoto.<sup>3</sup> Typiquement, ces études présentent le résultat de simulations numériques correspondant à différents scénarios, en vue d'appréhender l'incertitude qui règne sur le marché. Généralement, la documentation théorique qui encadre ces analyses est peu développée du point de vue de la description du modèle de simulation et de son fonctionnement. L'objectif recherché dans ce travail est d'expliquer de manière approfondie la méthodologie sous-jacente aux analyses quantitatives du marché du carbone.

Par soucis pédagogique, nous débutons notre exposition par le cas le plus simple : celui où un pays contraint n'a pas recours aux mécanismes de flexibilité pour respecter son engagement. Nous introduisons par la suite un second pays afin d'illustrer pourquoi deux pays prennent part à l'échange de droits d'émission, et pour comprendre comment l'échange est modélisé. Nous généralisons ensuite le raisonnement à une multitude de pays, certains pouvant être dotés d'air chaud. Nous décrivons par après comment s'articule le MDP au marché des permis, en tenant compte de la spécificité du mécanisme au niveau de la charge administrative associée, et d'autres

---

<sup>2</sup> Les permis négociables désignent les échanges de quotas entre pays de l'annexe B. Les projets d'Application Conjointe sont des investissements financés par un pays de l'annexe B en vue de réduire les émissions d'un autre pays de l'annexe B. Le pays qui finance l'opération voit son quota diminuer de la réduction engendrée par l'investissement, alors que le quota du pays hôte s'ajuste symétriquement à la hausse. Les projets MDP sont semblables aux projets d'Application Conjointe à la différence que le pays hôte est un pays en voie de développement. Nous renvoyons le lecteur aux articles 3, 6 et 12 du texte original du protocole de Kyoto pour des précisions sur les règles qui régissent ces mécanismes, et à l'article 17 des décisions prises à COP7 pour le MDP en particulier (UNFCCC, 2001).

<sup>3</sup> Voir van der Mensbrugge (1998), Zhang (1999), Sijm *et al.* (2000), Manne et Richels (2001), Bernard *et al.* (2002), Blanchard *et al.* (2002), Den Elzen et de Moor (2002), Eyckmans *et al.* (2002), Grutter *et al.* (2002), Jotzo et Michaelowa (2002), Löschel et Zhang (2002).

barrières limitant l'investissement dans les pays en voie de développement. Nous serons alors en mesure de décrire comment le prix est déterminé dans le marché international du carbone, et quelle est la place de chacun des mécanismes dans celui-ci. Dans la deuxième partie de ce travail, nous avons sélectionné quelques résultats issus des principaux modèles utilisés pour évaluer l'effet du Protocole de Kyoto. Nous montrons à l'aide de ceux-ci quel a été l'impact du retrait des Etats-Unis du Protocole et quel serait l'effet d'un comportement stratégique des pays détenant de l'air chaud.

## 2. Méthodologie

Nous présentons dans cette section la méthodologie sous-jacente aux analyses quantitatives du marché du carbone. Celles-ci permettent de déterminer la structure des échanges dans le marché international naissant des titres carbone, et de quantifier le coût de la réduction de gaz à effet de serre supporté par les différents pays qui participent au Protocole de Kyoto.

Pour simplifier l'analyse, il est supposé que la contrainte doit être respectée en 2010 –année centrale de la première période d'engagement– plutôt que sur l'ensemble de la période 2008-2012, en moyenne. Les agents ne tiennent pas compte des périodes futures, ceci revenant à dire que l'analyse est statique, centrée sur la détermination de l'équilibre du marché du carbone en 2010.<sup>4</sup> Il est supposé également que tous les pays respectent leurs engagements, sauf lorsque l'inverse est spécifié. De plus, tous les pays ont la possibilité d'acheter (vendre) des permis d'émission sur un marché parfait, dans la mesure où le scénario envisagé le permet.<sup>5</sup>

Les modèles top-down –capables de capturer en détail la structure économique d'un pays– sont utilisés en amont pour générer les données nécessaires à ces études. En effet, ces modèles permettent de déterminer quelle est la perte de PIB que supporte un pays donné s'il souhaite atteindre différents niveaux de réduction d'émissions de CO<sub>2</sub> par voie domestique. A l'aide de ces résultats, il est alors possible d'estimer les courbes de coût marginal de dépollution de chaque pays.<sup>6</sup> Les modèles top-down sont également utilisés pour réaliser une projection du niveau des émissions de CO<sub>2</sub> des différents pays en 2010 (scénario business-as-usual). En couplant cette projection d'émission avec l'objectif à atteindre pour chaque pays, nous obtenons l'effort de réduction que chaque pays doit réaliser en 2010.

---

<sup>4</sup> Les études analysées dans cette note se centrent uniquement sur le dioxyde de carbone issu de la combustion d'énergie fossile.

<sup>5</sup> Le permis représente ici les différents titres qui donnent le droit à émettre du CO<sub>2</sub>, c'est-à-dire des crédits qui proviennent de projets MDP (URCE), des crédits provenant de projets d'Application Conjointe (ERUs) ou des surplus de « Assigned Amount Unit » (AAU).

<sup>6</sup> La forme fonctionnelle de la MAC à estimer dépend du modèle utilisé. Par exemple, dans le modèle CERT (Grutter, 2002), l'utilisateur a le choix entre la forme quadratique ( $MC_i = a_i Q_i^2 + b_i Q_i$ ) et la forme exponentielle ( $MC_i = a_i (e^{b_i Q_i} - 1)$ ), où  $Q_i$  est le niveau de dépollution et  $MC_i$  est le coût marginal de la  $Q_i^{eme}$  unité réduite dans le pays  $i$ .  $a_i$  et  $b_i$  sont les paramètres à estimer. Par contre dans le modèle PET (Pelangi, 2001), la MAC est spécifiée comme suit :  $MC_i = \alpha Q_i^\beta$ . Les trois cas évoqués impliquent tous que le coût marginal de dépollution est strictement croissant.

Pour respecter son engagement, chaque pays a la possibilité de dépolluer chez lui ou de s'adresser au marché pour acheter des permis de polluer. La procédure algorithmique qui sous-tend la résolution des modèles quantitatifs du marché international du carbone consiste à trouver la combinaison réduction domestique – achat de permis qui minimise le coût du respect de Kyoto pour chaque pays. Par construction, la courbe de coût marginal de dépollution est strictement croissante. La réduction optimale de chaque pays est donc telle que le coût de la dernière unité dépolluée est égal au prix international du permis (égalisation du coût marginal dans tous les pays). Le prix du permis détermine la réduction optimale de chaque pays, mais le niveau de dépollution des pays influence à son tour le prix du marché en modifiant l'offre et la demande de permis. La rétroaction entre ces deux variables justifie l'utilisation des modèles. A l'aide de ceux-ci, il est en effet possible d'observer quel est le comportement optimal (réduction domestique – achat/vente de permis) de chaque région pour tout prix de la tonne de carbone. Si, pour un prix donné, la somme des achats de permis est supérieure (inférieure) à la somme des ventes, le prix doit augmenter (diminuer) pour obtenir un équilibre de marché. Tant que la demande (l'offre) de permis est excédentaire, le prix du permis augmente (diminue) et le modèle étudie comment l'offre et la demande évoluent. La procédure s'arrête lorsque le prix du carbone permet d'équilibrer le marché. La décision optimale de chaque pays est alors consistante avec celle des autres, la somme des achats de permis égalise la somme des ventes de permis.

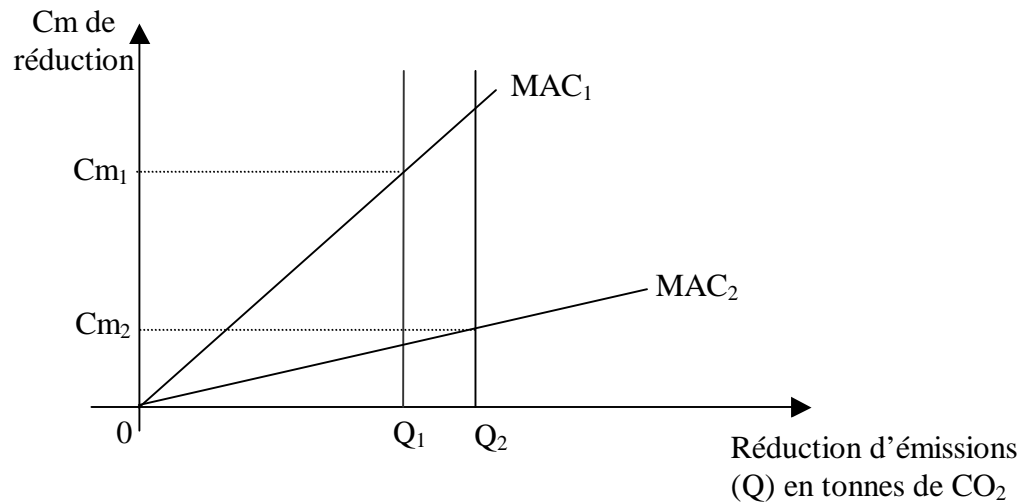
Afin de clarifier la démarche, nous illustrons ci-dessous, à l'aide d'une analyse graphique, la manière dont les mécanismes de flexibilité sont modélisés. Nous supposons, pour simplifier, que les courbes de coût marginal de dépollution sont linéaires.

Nous envisageons successivement trois cas. Dans le premier, la réduction d'émission nécessaire pour satisfaire les engagements de Kyoto doit être réalisée par le biais de politiques domestiques uniquement. Dans le second cas, les pays de l'annexe B peuvent s'échanger des permis d'émissions pour respecter leur objectif. Le dernier scénario admet, outre le recours aux permis, la possibilité de comptabiliser les efforts de réduction effectués dans les pays non annexe B par le MDP.

### ***2.1. Politique de réduction domestique***

Dans la figure 1, nous avons représenté la manière dont deux pays de l'annexe B (notés 1 et 2) sont affectés s'ils veulent atteindre leur objectif défini dans le Protocole de Kyoto par des réductions domestiques uniquement.  $Q_1$  et  $Q_2$  sont les efforts nets à réaliser dans les deux pays,  $MAC_1$  et  $MAC_2$  sont les droites de coût marginal correspondantes.

Figure 1: le coût de la réduction domestique



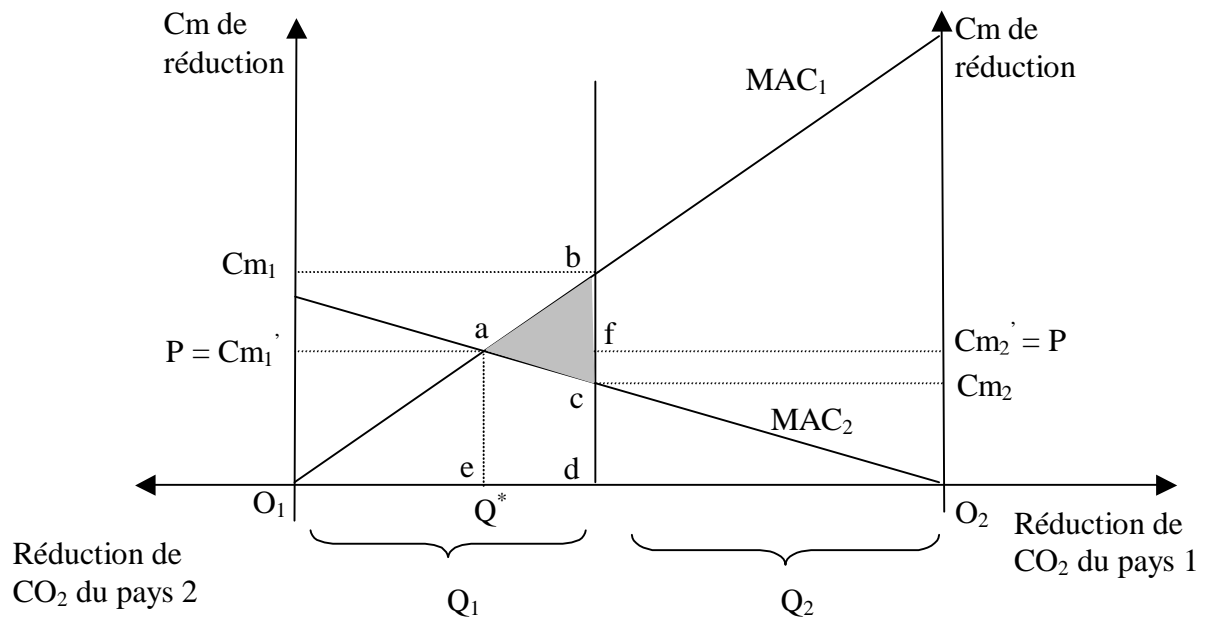
Le coût du respect du protocole pour chaque pays correspond à l'aire en dessous de la courbe de coût marginal, bornée par la contrainte, soit

$$\int_0^{Q_1} MAC_1 \text{ et } \int_0^{Q_2} MAC_2 \text{ respectivement.}$$

## 2.2. Politique domestique et échange de permis.

Nous illustrons à la figure 2 comment est modifié l'équilibre lorsque les pays 1 et 2 participent à l'échange de permis. Pour ce faire, nous y avons modifié l'origine à partir duquel la courbe de coût marginal du pays 2 est tracée (elle part de O<sub>2</sub>). La direction de la comptabilisation des efforts de réduction est également inversée. Toutefois, il s'agit des deux mêmes courbes de coût marginal de dépollution (MAC<sub>1</sub> et MAC<sub>2</sub>) ainsi que des mêmes contraintes à respecter (Q<sub>1</sub> et Q<sub>2</sub>) que sur la figure 1.

Figure 2: L'échange de permis entre deux pays

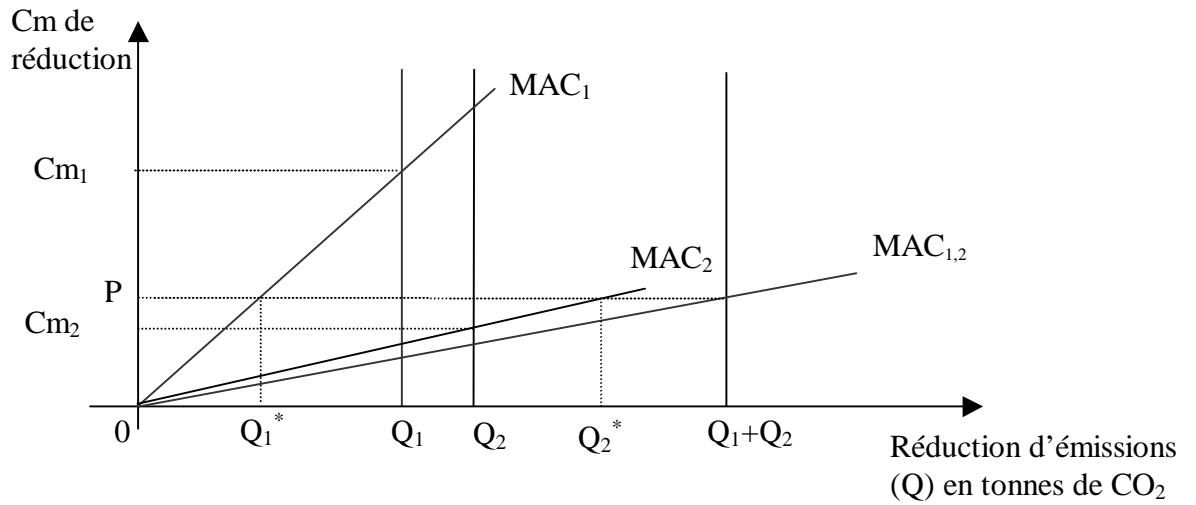


Lorsque les pays 1 et 2 peuvent s'échanger des permis dans un marché parfait, il est avantageux pour eux de le faire jusqu'au moment où le coût de la dernière unité dépolluée est égalisé dans les deux pays, le prix des permis (P) étant ainsi déterminé ( $Cm_1 = Cm_2 = P$ ). En effet, partant de l'équilibre domestique, les deux pays peuvent réaliser un gain si le pays qui a le coût marginal de dépollution le plus faible (ici le pays 2) à cet équilibre réduit ses émissions de CO<sub>2</sub>, et revend ce surplus de dépollution au pays 1 à un prix compris entre  $Cm_1$  et  $Cm_2$ . Par condition de non-arbitrage, l'équilibre se déplace ainsi au point  $Q^*$  auquel correspondent les quantités  $Q_1^*$  et  $Q_2^*$  de réductions optimales réalisées par les deux pays. En comparant les coûts associés au respect de Kyoto dans les deux scénarii, nous constatons que le commerce de permis permet à chaque pays de réaliser un gain.<sup>7</sup>

Remarquons que, partant de la figure 1, si nous agrégeons les droites de coût marginal de dépollution, nous obtenons une nouvelle courbe ( $MAC_{1,2}$ ) qui définit la somme des quantités dépolluées dans les deux pays pour tout prix de la tonne de CO<sub>2</sub>. A l'intersection entre la courbe de coût marginal de dépollution agrégée et la droite représentant l'objectif Kyoto des deux pays, nous obtenons le prix du permis (P) qui est tel que la réduction optimale réalisée à ce prix par les deux pays ( $Q_1^* + Q_2^*$ ) est égale à la réduction qu'ils doivent effectuer ( $Q_1 + Q_2$ ). Nous montrons à la figure 3 que les importations de permis du pays 1 ( $Q_1 - Q_1^*$ ) concordent avec les exportations de permis du pays 2 ( $Q_2^* - Q_2$ ). Donc, nous trouvons le prix qui est tel que l'offre et la demande s'égalisent. Ce prix qui définit l'équilibre du marché.

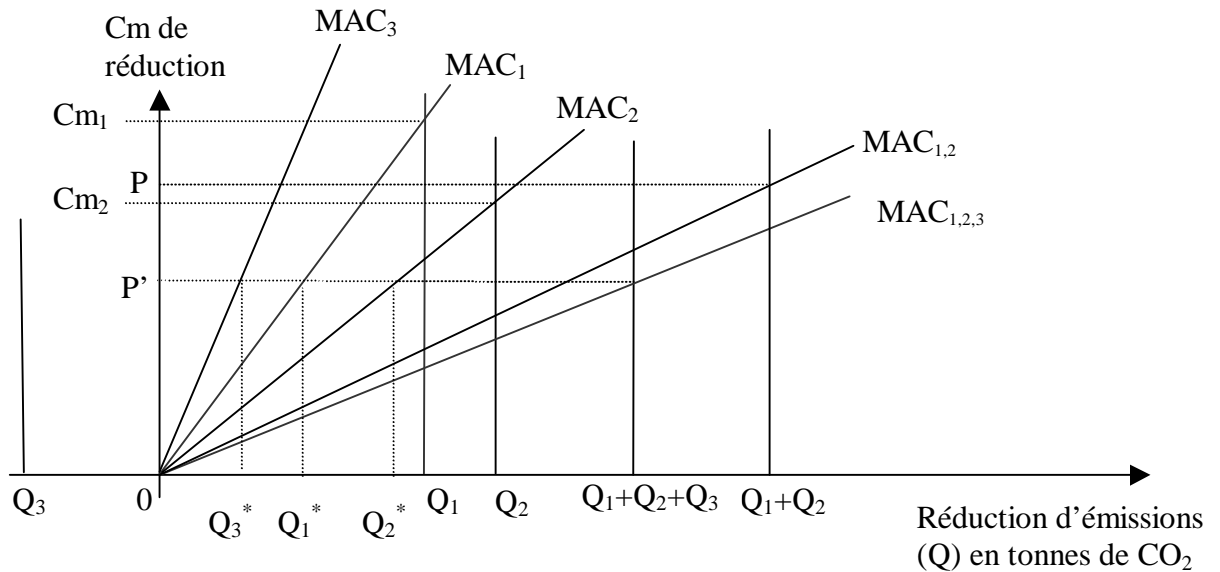
<sup>7</sup> Le coût de la réduction diminue de  $abf$  pour le pays 1 et de  $acf$  pour le pays 2 (caractère win-win de l'échange).

Figure 3 : L'agrégation des MAC



L'intérêt de la technique d'agrégation s'accroît avec le nombre de pays que l'on traite. Nous le montrons ci-dessous en introduisant le pays 3 qui détient de l'air chaud. Par définition, celui-ci dispose de quotas supérieurs à ses émissions, donc  $Q_3$  est négatif. De plus, des réductions additionnelles peuvent être réalisées dans ce pays par l'intermédiaire de projets d'Application Conjointe (AC). La relation entre la quantité réduite par projets d'Application Conjointe et le coût de leur mise en oeuvre est représentée par  $MAC_3$ .

Figure 4 : L'air chaud et les projets d'Application Conjointe



Dans notre cadre d'analyse, tout l'air chaud sera vendu sur les marchés puisqu'il est disponible à coût nul. L'équilibre est tel qu'il minimise le coût du respect des engagements des pays 1 et 2, déduction faite de l'air chaud ( $Q_1+Q_2+Q_3$ ). En nous servant de  $MAC_{1,2,3}$ , l'agrégation des courbes de coût marginal de dépollution individuel, nous obtenons immédiatement le prix des permis qui équilibre notre système ( $P'$ ). Connaissant ce prix, nous obtenons les efforts optimaux de chaque pays ( $Q_1^*$ ,  $Q_2^*$ ,  $Q_3^*$ ). Le respect des engagements du protocole représente alors un coût pour le pays  $i$  défini par :

$$\int_0^{Q_i^*} MAC_i + (Q_i - Q_i^*) P' .$$

Remarquons que le pays 3 vend tout son air chaud ( $Q_3$ ) et que des projets d'Activité Conjointe y sont entrepris ( $Q_3^*$ ). Afin de pouvoir comparer cet équilibre avec ceux que nous avons présentés précédemment, nous avons également représenté l'équilibre domestique des pays 1 et 2 (à l'intersection entre la MAC et l'objectif individuel) ainsi que l'équilibre de ces pays lorsqu'ils sont seuls à pratiquer l'échange de permis ( $P$ ). Nous observons ici que le prix de la tonne de carbone est inférieur lorsque l'on introduit le pays qui détient de l'air chaud ( $P' < P$ ).

Nous avons montré que, lorsque les pays ont un accès parfait au marché des permis, nous pouvons retrouver le prix qui équilibre ce marché en recourant à la technique d'agrégation (ou d'addition horizontale) des objectifs et des courbes de coût marginal de dépollution. Une fois le prix de la tonne de carbone obtenu, nous pouvons déterminer la situation exacte de chaque acteur sur ce marché (vendeur ou acheteur, et en quelle quantité), ainsi que le gain que chacun retire de l'échange (en comparant le coût de chaque pays



selon qu'il a accès au marché des permis ou pas). Dans la suite de la note, nous utilisons  $MAC_B$  pour faire référence à la courbe de coût marginal de dépollution de l'agrégat « pays de l'annexe B ». Nous montrons ci-dessous que cette approche nous permet d'évaluer le potentiel macroéconomique du MDP.

### 2.3. *Système d'échange mondial*

Introduisons maintenant les pays non annexe B dans notre discussion. Nous parlerons de MDP pour faire référence à la délocalisation de l'effort de dépollution des pays de l'annexe B vers les pays non annexe B par l'intermédiaire d'achat et vente d'Unité de Réduction Certifiée (URCE). Pour intégrer le MDP dans cet exercice graphique, nous supposons que les pays non-annexe B reçoivent un quota égal à la projection de leurs émissions dans le scénario business-as-usual (BAU).<sup>8</sup> Ces pays peuvent par conséquent offrir une quantité de URCE sur les marchés internationaux égale à leur effort de réduction. Deux conditions essentielles du MDP sont ainsi respectées. Premièrement, les pays non-annexe B ne sont pas contraints de réduire leurs émissions de  $CO_2$  durant la première période d'engagement de Kyoto. Ensuite, les URCE ont la même valeur que les permis sur le marché international.

Nous adoptons une manière alternative de représenter le marché des crédits d'émission. En abscisse, nous comptabilisons la quantité d'émission de  $CO_2$  (E) plutôt que la réduction de ceux-ci. Les émissions des pays contraints de l'annexe B se mesurent à partir de  $0^B$ . Le point BAU correspond aux émissions de ces pays dans le scénario business-as-usual. Nous avons supposé ici que le Protocole de Kyoto représente une contrainte réelle pour l'agrégat « pays de l'annexe B ». Cela signifie que l'air chaud n'est pas suffisant pour satisfaire tous les efforts de réduction à fournir ( $Q_B > \text{air chaud}$ ).

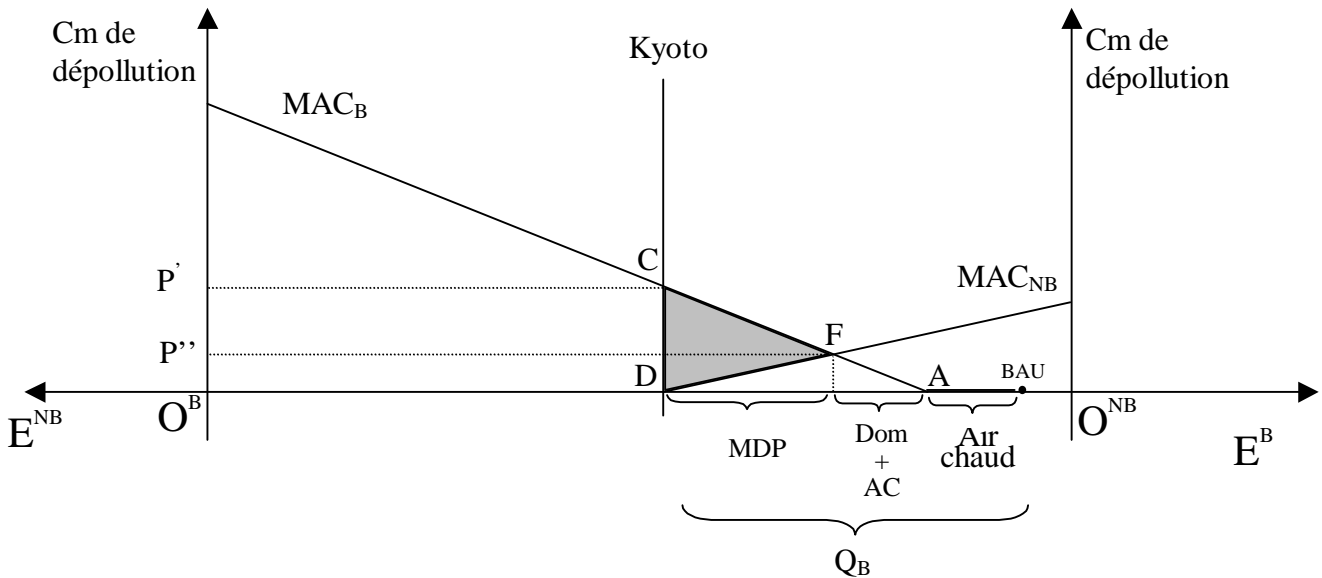
$MAC_{NB}$  est construite de la même manière que  $MAC_B$  en agrégeant les courbes de coût marginal de dépollution des pays non annexe B. Elle coupe l'axe horizontal au point D, qui correspond à l'objectif fictif qui leur est attribué. Il est à noter que la pente de cette courbe est inférieure à la pente de  $MAC_B$ , car les possibilités de dépollution sont moins coûteuses dans les pays en voie de développement pour tout niveau de dépollution donné.<sup>9</sup> Nous n'avons pas introduit de réductions à coût négatif dans les pays non annexe B car ces dernières ne sont pas éligibles en tant que MDP (clause d'additionalité financière).

---

<sup>8</sup> Nous suivons ici l'approche de Ellerman et Decaux (1998) et Baron (1999).

<sup>9</sup> Baron (1999). D'après lui, «Relatively low energy prices and fast economic growth in these countries explain the low-cost potential for emissions reductions. »

Figure 5 : Le MDP

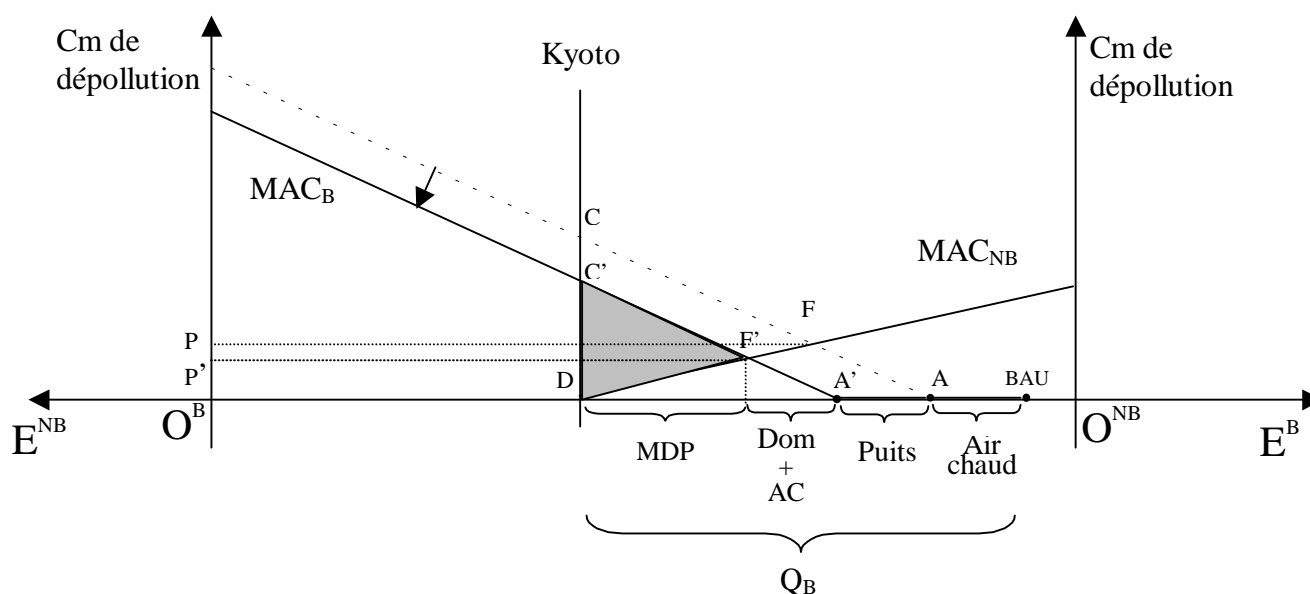


Nous avons représenté le scénario où les pays de l'annexe B s'échangent des permis dans un marché parfait ( $P'$ ). A ce prix, le marché est équilibré entre vendeurs et acheteurs (voir figure 4), et le coût total du respect du protocole correspond au triangle ADC. Lorsque la réduction nécessaire au respect de l'engagement ( $Q_B$ ) peut être réalisée en partie dans les pays non annexe B, le prix du permis (et des URCE) s'établit à  $P''$  et le coût de Kyoto au niveau mondial correspond à la surface DFA. La comparaison du coût associé à cet équilibre avec celui de l'équilibre de référence sans MDP révèle le gain économique au niveau agrégé associé au MDP, gain représenté par la surface CDF.

Il est possible d'améliorer la description théorique du marché réalisée ci-dessus en y intégrant les puits de carbone, qui sont considérés comme des réductions à part entière dans les modèles. Les projets puits regroupent l'ensemble des possibilités de séquestration de carbone éligible dans le cadre du protocole de Kyoto. Le coût de la mise en œuvre de tels projets est nul dans la modélisation.<sup>10</sup> Par conséquent, chaque Partie utilise une quantité de crédits issus de projets de séquestration égale à ce qui lui est accordé dans les accords de Marrakech. Nous représentons dans la figure 6 comment les pays contraints de l'annexe B arbitrent entre les différents instruments pour respecter leurs objectifs.

<sup>10</sup> Eyckmans *et al.* (2002) soulignent qu'il s'agit d'une hypothèse forte étant donné le coût d'opportunité de la conversion de terre agricole en forêt est élevé. Cependant, ils pensent que les Parties vont essayer de rendre éligibles les projets qui auraient eu lieu de toute façon, et dans ce sens n'induisent pas de coûts. Nous renvoyons le lecteur aux Articles 3.3 et 3.4 du protocole de Kyoto et documents officiels de l'UNFCCC (2001) pour les détails sur la réglementation des projets de séquestration.

Figure 6 : Répartition optimale de l'effort



Lorsque les crédits des puits de carbone peuvent être comptabilisés, le prix du marché chute à P'. A ce prix, moins de projets MDP, d'Application Conjointe et de réductions domestiques sont entrepris.

Nous présentons dans le tableau 1 les résultats auxquels aboutissent les études que nous avons sélectionnées dans le cas où tous les pays participent à l'échange de permis.

Tableau 1 : Prix d'équilibre (2000 USD) et répartition de l'effort (MtC)

Modèle / auteur	Réduction requise (Q <sub>B</sub> )	Prix du permis (\$/tC)	Réduction domestique	MDP	AC <sup>11</sup>	Air chaud	Puits
CICERO	506	3,76	29,2 (5,8%)	115,7 (22,9%)	30,8 (6,1%)	138,4 (27,3%)	192 (37,9%)
RIIA	575	4,03	31,8 (5,5%)	123,6 (21,5%)	33,5 (5,8%)	194,0 (33,8%)	192 (33,4%)
EPPA	1303	26,95	215,4 (16,5%)	613,1 (47,1%)	197,4 (15,1%)	85,0 (6,6%)	192 (14,7%)
Communications nationales <sup>12</sup>	552	5,37	41,4 (7,4%)	161,0 (29,1%)	47,3 (8,6%)	111,0 (20,1%)	192 (34,8%)
GTEM	778	3,69	27,8 (3,5%)	113,6 (14,6%)	25,1 (3,2%)	419,9 (54,0%)	192 (24,7%)

Source: Chen (2002).

<sup>11</sup> Toutes les réductions réalisées dans les anciens pays de l'Union soviétique et de l'Europe de l'Est sont assimilées à des projets de mise en œuvre conjointe par hypothèse.

<sup>12</sup> Projections des émissions business-as-usual à partir des communications nationales, combinées avec des courbes marginales de dépollution de GTEM pour calculer l'équilibre.

Les prix d'équilibre de ces études s'étendent de 3,76 \$/tC à 26,95\$/tC. Remarquons qu'il existe une relation entre le prix de la tonne de carbone et la réduction requise. Cette corrélation se justifie théoriquement par l'hypothèse de coût marginal de dépollution croissant. Partant de cette constatation, il peut sembler surprenant que GTEM, bien que fournissant une valeur élevée pour la réduction à réaliser, soit le modèle qui prédise le prix le plus bas. Ceci s'explique toutefois par la vente d'une quantité abondante d'air chaud sur le marché. GTEM est en effet le modèle qui prédit l'effort net ( $Q_B$  - air chaud - puits) à réaliser le plus faible. Les URCE (crédits provenant du MDP) permettent aux pays contraints de l'annexe B de remplir entre 14,6% et 47,1% de leur objectif. Le prix plus élevé de la tonne de carbone dans les modèles EPPA implique qu'une quantité plus importante de projets MDP et d'Application Conjointe sont rentables, et donc réalisés. Soulignons enfin que l'air chaud (crédits à valeur environnementale nulle) et les puits de carbone (dont la durabilité de la réduction peut être limitée) dominent le marché d'après ces analyses. Ils permettent ensemble de réaliser entre 21,3% et 78,7% de la réduction lorsqu'ils sont pris en compte dans les modèles que nous envisageons (avec une moyenne de 57,5%).

### 3. Extensions

Nous décrivons ci-dessous la manière dont certaines variantes exposées dans la littérature peuvent être introduites dans notre modèle. Nous montrons dans cette section que l'approche permet d'étudier l'effet du retrait des Etats-Unis sur l'équilibre du marché du carbone. Il est également possible de tenir compte des imperfections du marché qui réduisent le potentiel d'utilisation du MDP (en intégrant un paramètre d'accessibilité sur les projets MDP) ou d'intégrer dans le modèle un surcoût à la réalisation de projets MDP pour refléter le poids administratif associé à ce mécanisme. Pour clôturer cette section, nous discutons du scénario où la Russie et les pays de l'Europe de l'Est se comportent de manière stratégique, limitant leur offre de crédits afin d'augmenter leur profit.

Pour chacune de ces extensions, nous expliquons la raison de son introduction dans le scénario central, nous précisons comment l'introduire dans la modélisation et nous illustrons son impact sur les résultats obtenus, en nous appuyant sur des analyses quantitatives existantes.

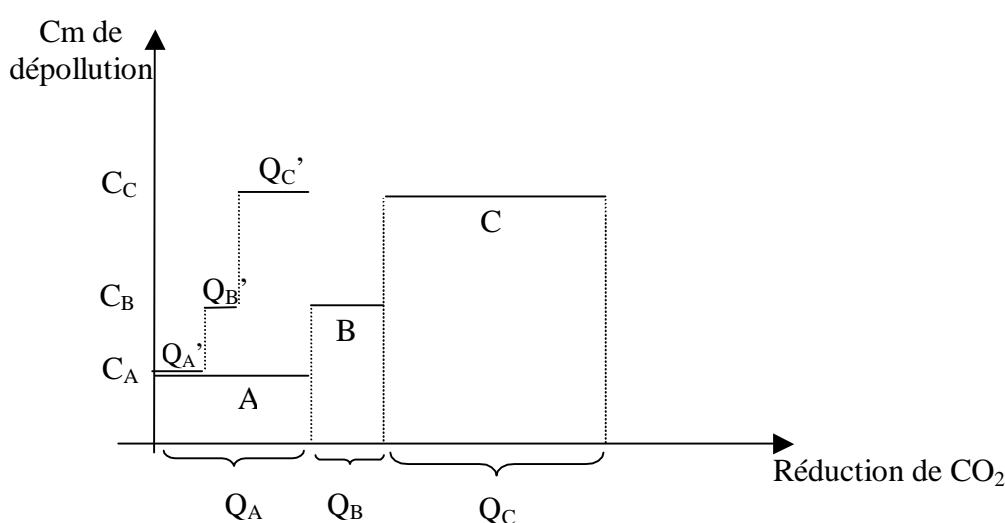
#### **3.1 Accessibilité limitée des possibilités de réduction dans les pays non annexe B**

Un modèle fonctionnant en concurrence parfaite suggère que toutes les possibilités de réduction d'émissions rentables sont entreprises. Ceci est toutefois peu réaliste, surtout dans le cas des pays non annexe B. En effet, comme le soulignent Criqui *et al.* (2002) en parlant des projets MDP, « il existe des difficultés techniques ou institutionnelles dans la définition, l'identification et la mise en œuvre de tels projets (manque d'infrastructure ou d'expertise par exemple), ainsi que de la difficulté d'estimer les références correspondantes » qui ne sont pas prises en compte dans les modèles top-down. Afin d'en tenir compte, ils introduisent dans leur modèle

un facteur d'accessibilité pour les projets MDP, « traduisant le fait que seulement une fraction des réductions d'émissions totales potentielles au sein des secteurs énergétiques des pays non-Annexe B sont des projets MDP effectivement réalisables. »

Pour illustrer cette idée, considérons les courbes de coût marginal de dépollution des modèles bottom-up. Dans ces modèles, les différentes techniques de réduction des émissions sont identifiées (A,B,C), pour chaque technique, les ingénieurs y associent un coût ( $C_A, C_B, C_C$ ) et un potentiel de réduction si cette technique est adoptée de manière généralisée dans l'économie ( $Q_A, Q_B, Q_C$ ). Ces courbes ont la particularité d'être en escalier.

Figure 7 : le facteur d'accessibilité

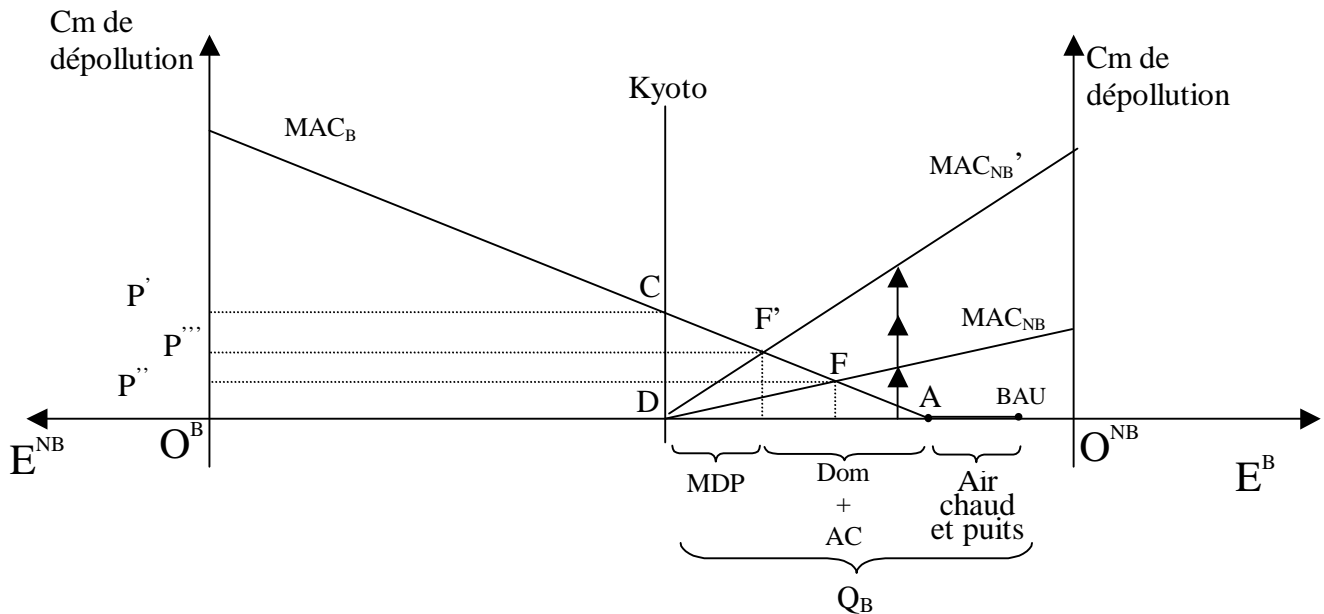


Supposons que seulement 1/3 du potentiel de réduction de chaque technique soit accessible, cela impliquerait que pour un coût unitaire de  $C_A$ , il serait possible de réduire seulement 1/3 de  $Q_A$ , c'est-à-dire  $Q_A'$ . Toute réduction supplémentaire à  $Q_A'$  devrait être réalisée à l'aide de la technique B plus coûteuse ( $Q_B'$  peut être dépollué à un coût unitaire de  $C_B$ ), puis l'aide de la technique C.

Les courbes de coût marginal de dépollution des économistes sont continues. Toutefois, il est possible de développer le même raisonnement en faisant subir une rotation à la courbe (Grütter *et al.* 2000). La part du MDP dans le marché diminue, le prix du permis augmente puisque l'offre baisse, et le coût total des activités de dépollution imposées par le protocole augmente de la surface DFF'.<sup>13</sup>

<sup>13</sup> Remarquons qu'il existe un effet de retour par les prix qui limite la baisse de projets MDP entrepris. Par exemple, supposons que la réalisation des projets MDP est limitée à 50% du potentiel de réduction total. La hausse du prix que cela induit (voir graphe) implique que les projets MDP entrepris sont réduits, mais de moins de la moitié par rapport au scénario concurrentiel.

Figure 8 : Accessibilité réduite et modification de l'équilibre



L'hypothèse faite sur le facteur d'accessibilité est cruciale pour déterminer la contribution du MDP dans le marché du carbone. A titre illustratif, Blanchard *et al.* (2002) font varier ce paramètre de 10 à 100% et trouvent que, sous les conditions particulières de l'accord de Bonn-Marrakech, la part du MDP dans l'effort de réduction des émissions s'étend de 16% à 56% de la réduction totale au niveau de l'ensemble des pays Annexe B.

### 3.2 Le retrait des Etats-Unis

Même si la Russie ratifie le Protocole de Kyoto, condition nécessaire à son entrée en vigueur, l'impact environnemental du Protocole est considérablement réduit sans la participation des Etats-Unis (Eyckmans *et al.* 2002).

Comment modéliser l'abstention d'un pays ? Partant de la figure 4, l'effet du retrait du pays 1 se répercute sur l'effort de dépollution à réaliser, évoluant de  $(Q_1+Q_2+Q_3)$  à  $(Q_2+Q_3)$ . De plus la courbe de coût marginal de dépollution agrégée devient  $MAC_{2,3}$ , la somme des courbes des pays 2 et 3. Une fois ces modifications réalisées, l'ajustement de l'équilibre sur le marché du carbone est immédiat. (non représenté)

Nous exposons dans le tableau 2 le résultat des modèles étudiés précédemment lorsque les Etats-Unis ne participent pas.

*Tableau 2 : Prix d'équilibre (2000 USD) et répartition de l'effort (MtC) sans les Etats-Unis.*

Modèle / auteur	Réduction requise (Q <sub>B</sub> )	Prix du permis (\$/tC)	Réduction domestique	CDM	MOC	Air chaud	Puits
EPPA	610,8	9,64	43,9	270,5	82,4	84,0	129,2
CICERO	177,5	0	0	0	0	138,4	129,2
GTEM	224,5	0	0	0	0	419,9	129,2
RIIA	163,0	0	0	0	0	191,0	129,2
Communications nationales	140,0	0	0	0	0	110,0	129,2

Source : Chen (2002)

Lorsque la réduction que doivent réaliser les pays de l'annexe B est inférieure à la somme de l'air chaud et des puits, aucune réduction d'émission n'est entreprise par un autre moyen. Le prix de vente sur le marché est égal au coût de la dernière unité réduite, qui est nul dans ce cas. Les simulations de quatre modèles sur les cinq relevés prédisent une telle issue. Le prix dans le modèle EPPA –qui est celui qui minimise les répercussions du retrait des Etats-Unis– évolue de 26,95\$/tC à 9,64\$/tC. Les réductions réalisées par CDM diminuent de 613,1 MtC à 270,5 MtC. Cela signifie que selon le modèle le plus optimiste, les recettes de la vente de CER sont réduites de plus de 80%, évoluant de 16,523 milliards \$US à 2,608 milliards \$US.

### **3.3 Les coûts de transaction**

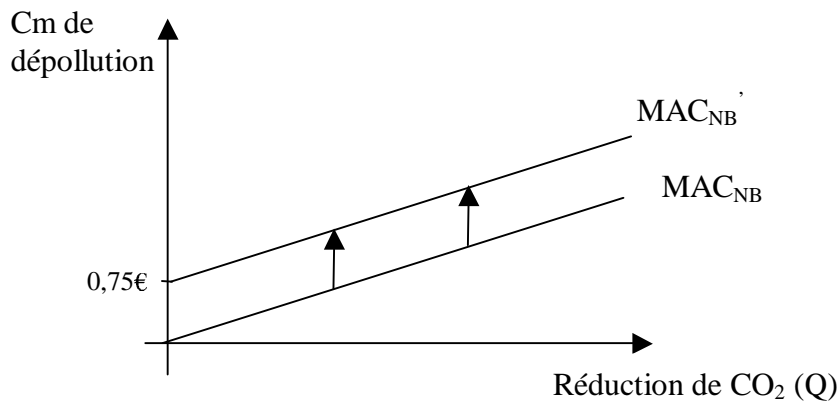
Il existe des coûts de transaction différenciés pour tous types de crédits échangés sur le marché international, reflétant le cadre institutionnel spécifique de chaque mécanisme.

Les coûts de transaction associés aux projets MDP traduisent l'existence de coûts spécifiques au mécanisme tels que les coûts administratifs, de contrôle et de certification des unités. Supposons, comme le font Jotzo et Michaelowa (2002), que ceux-ci augmentent les coûts de réduction d'une tonne de CO<sub>2</sub> de 0,75€ pour tout niveau de réduction considéré.<sup>14</sup> Graphiquement, cela induit un déplacement vers le haut des courbes de coût marginal de dépollution de ce coût fixe additionnel. Si les coûts de transaction affectent les différents pays non annexe B de la même manière, il est possible d'étudier l'effet de cette variante au niveau agrégé en modifiant directement MAC<sub>NB</sub>.

<sup>14</sup> Jotzo et Michaelowa (2002) introduisent les coûts suivants dans leur modèle :

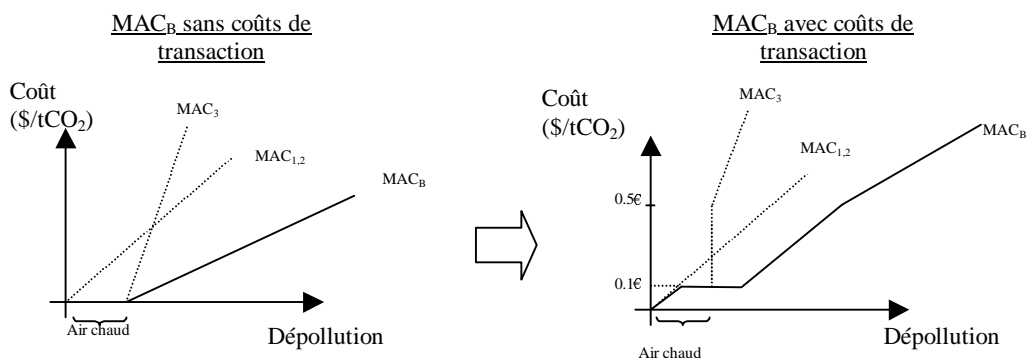
- 0,75\$ par tonne de CO<sub>2</sub> réduit pour les crédits résultant de projets MDP,
- 0,5\$ pour les réductions provenant de projets d'Application Conjointe,
- 0,1\$ par tonne d'air chaud.

Figure 9 : L'effet des coûts de transaction sur  $MAC_{NB}$ .



Suivant un même raisonnement, la courbe de référence des pays de l'annexe B est également modifiée. A cet effet, soulignons que l'air chaud est un crédit qui est rentable lorsque le prix des permis compense les frais fixes (à partir de 0,1€ dans le cas envisagé par Jotzo et Michaelowa, 2002). D'autre part, les réductions réalisées par l'intermédiaire de projets d'Application Conjointe sont chacune plus coûteuse de 0,5\$ dans la modélisation. La prise en compte de ces modifications nous amène à devoir reconstruire  $MAC_B$  en séparant les pays détenant de l'air chaud (dans lesquels il existe un potentiel pour des projets d'Application Conjointe) et les pays occidentaux de l'annexe B. Nous le faisons à la figure 10. Le pays 3 est le seul pays annexe B qui détient de l'air chaud (songeons à l'agrégat formé de la Russie et des pays de l'Europe de l'Est), alors que les pays 1 et 2 sont les pays contraints de l'annexe B.

Figure 10 : L'effet des coûts de transaction sur  $MAC_B$ .



Sur les deux graphes de la figure 9 sont représentées en trait continu les courbes de coût marginal de dépollution de l'agrégat « pays de l'annexe B » selon que l'on introduit ou non des coûts de transaction dans la modélisation. Décomposons en quatre tronçons la  $MAC$  modifiée décrite dans le graphe de droite. Premièrement, entre 0€ et 0,1€ par tonne de  $CO_2$ , seule une faible fraction de projet domestique est rentable. A 0,1 €/t $CO_2$ ,



tout l'air chaud peut être vendu. Entre 0,1€ et 0,5€/tCO<sub>2</sub> seuls des projets domestiques sont réalisés à la marge. Enfin, au-delà de 0,5€, les deux types de réductions (domestiques et par projets d'Application Conjointe) sont entrepris.

Le nouvel équilibre du marché (non représenté) se fixe simplement à l'intersection des deux nouvelles courbes MAC<sub>B</sub> et MAC<sub>NB</sub>. Le MDP éligible en est d'autant plus affecté que le prix d'équilibre est faible.

### **3.4 Offre limitée d'air chaud**

Le prix d'équilibre de la première période d'engagement estimé aujourd'hui est si bas que le gain de la vente est relativement faible. Dans ces conditions, il est fort probable que les anciens pays de l'Union soviétique décident de conserver une partie de leur air chaud, soit pour réaliser leurs engagements futurs, soit pour les vendre à un prix plus élevé lors de la deuxième période d'engagement. De plus, toujours sous l'hypothèse de prix bas, nous avons vu que l'air chaud domine les autres moyens de réduction, ce qui fait de la Russie un *leader* sur le marché. Elle pourrait alors augmenter ses gains en limitant son offre afin de faire grimper les prix.

Les auteurs qui se sont penchés sur la question ont cherché la valeur optimale d'air chaud vendu. Löschel et Zhang (2002) étudient à cet effet trois cas de figure à l'aide du modèle POLES. Dans le premier, ils supposent que les pays de l'ex-Union soviétique se comportent en monopoleur (36\$/tC). Ensuite, ils envisagent la possibilité que les pays de l'ex-Union soviétique et les pays de l'Europe de l'Est agissent stratégiquement mais de manière non coopérative (duopole non coopératif) (46\$/tC). Enfin, ils analysent le cas où ces mêmes pays forment un cartel (66\$/tC). Dans ce dernier cas, le groupe maximise son revenu en offrant 73% de leur dotation d'air chaud. Den Elzen et de Moor avec le modèle FAIR trouvent que le cartel limiterait l'offre d'air chaud à 60% de leur dotation totale.

Ces analyses du comportement stratégique des acteurs tiennent compte uniquement de l'aspect « gain statique » lié à l'augmentation du prix en première période provoquée par une limitation de l'offre d'air chaud. C'est-à-dire, elles montrent qu'il est avantageux pour les pays de l'ex-Union soviétique de « brûler » une partie de leur droits d'émission. Si l'on intégrait la possibilité que ces pays puissent épargner leurs permis pour en faire usage lors de la période post-Kyoto, les résultats montreraient sans aucun doute que la quantité d'air chaud non vendue lors de la première période d'engagement du Protocole serait plus importante encore.

## **4. Conclusion**

Nous nous sommes intéressés dans cette note à la méthodologie des analyses quantitatives du marché international du carbone, et plus particulièrement à la manière dont peuvent s'articuler les différents mécanismes de flexibilité dans la modélisation. Nous avons montré que le Protocole de Kyoto peut être compris comme créant un marché où offre et demande de droits

d'émettre des gaz à effet de serre déterminent un équilibre. L'équilibre se caractérise par l'égalisation du coût de la dernière unité dépolluée dans tous les pays.

Cette dernière condition peut laisser croire que la réduction d'émission sera réalisée principalement dans les pays non annexe B par le biais du Mécanisme pour un Développement Propre car les courbes de coût marginal de dépollution y sont plus plates. Cette conclusion est remise en question suite à la décision des Etats-Unis de ne pas participer au Protocole. Il semble en effet que l'air chaud et les projets puits domineront le volet offre du marché de permis, ne laissant que peu de place aux réductions domestiques ou au MDP.

Les auteurs sont unanimes pour dire que les résultats numériques doivent être interprétés avec précaution. Les résultats issus d'un modèle sont sensibles aux hypothèses de celui-ci. En conséquence, deux modèles différents ne fournissent jamais les mêmes courbes de coût marginal ou les mêmes projections d'émission. L'intérêt des modèles ne se limite toutefois pas aux prédictions qui en résultent. En effet, une utilisation appropriée de ceux-ci contribue à améliorer notre compréhension des mécanismes centraux du marché du carbone et à mieux appréhender l'incertitude qui règne sur ce marché. C'est par ailleurs ce que les auteurs mettent en avant lorsqu'ils parlent de leurs études. « Above all, the CERT model is designed to test the sensitivity of market outcomes with respect to the many uncertainties that characterize this emerging market. » (Grütter *et al.* 2000). « As with any model of this kind, the results should not be interpreted as forecasts, but rather as illustrations of the effect of changes in market parameters ». (Jotzo et Michaelowa 2002).

## **Bibliographie**

Baron, R. 1999, *The Kyoto Mechanism : How Much Flexible Do they Provide?*, available on : <http://www.iea.org/clim/cop5/pubs/lanza.pdf>.

Bernard, A., Reilly, J., Vielle, M., Viguier, L. 2002, *The Effects of US Withdrawal from the Kyoto Protocol on International Emission Trading*, Paper prepared for the International Energy Workshop jointly organized by the Energy Modeling Forum (EMF), International Energy Agency (IEA) and IIASA, 18–20 June 2002 at Stanford University.

Blanchard, O., Criqui, P. and Kitous, A. 2002, *After the Hague, Bonn and Marrakech*, Institut d'Economie et de Politique de l'Energie, Grenoble.

Bohringer, C. 2002, *Climate politics from Kyoto to Bonn: from little to nothing?* The Energy Journal 23, 51–71.

Chen, W. 2002, *Carbon Quota price and CDM potentials after Marrakesh*, Global Climate Institute, Tsinghua University, Beijing.

Den Elzen, M.G.J., de Moor, A.P.G., 2002, *Evaluating the Bonn-Marrakesh agreement*, Climate Policy 2, 111–117.

Eyckmans, J., Van Regemorter, D. and Vansteenbergh, V. 2002, *Is Kyoto Fatally Flawed? An Analysis with MacGEM*, Nota di Lavoro 43.2002, Fondazione Eni Enrico Mattei, Milan. Available on: <http://www.core.ucl.ac.be/climneg/publications.htm>

Ellerman, A.D and Decaux, A. 1998, *Analysis of Post-Kyoto CO<sub>2</sub> Emissions Trading Using Marginal Abatement Curves*, MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change, Report 40, Cambridge MA.

Ellerman, A.D. and Decaux, A. 1999, *The Effect on Developing countries of the Kyoto Protocol and CO<sub>2</sub> Emission Trading*, MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change, Report 41, Cambridge MA.

Grütter, J., Kappel, R., and Staub, P. 2002, *Simulating the Market for greenhouse Gas Emission Reductions : The CERT Model*, Grütter consulting.

Jotzo, F., and Michaelowa, A. 2002, *Estimating the CDM Market Under the Marrakech Accords*, Climate Policy, vol. 2, no. 2–3, 179–201.

Loschel, A., Zhang, Z.X. 2002, *The Economic and Environmental Implications of the US Repudiation of the Kyoto Protocol and the Subsequent Deals in Bonn and Marrakech*. Weltwirtschaftlich. Arch. 138, 711–746.

Manne, A.S., Richels, R.G. 2001, *US Rejection of the Kyoto Protocol: The Impact on Compliance Costs and CO emissions*, AEI-Brookings Joint Center for Regulatory Studies, Working Paper 01– 212.

Pelangi 2001, *The PET Model: Preliminary documentation*. Available on <http://www.southsouthnorth.org/library.asp>

Sijm, J.P.M., Ormel, F.T., Martens, J.W. *et al.* 2000, *Kyoto Mechanisms. The Role of Joint Implementation, the Clean Development Mechanism and Emissions Trading in Reducing Greenhouse Gas Emissions*, ECN report C-00-026, Petten, The Netherlands.

van der Mensbrugge, D. 1998, *A (Preliminary) analysis of the Kyoto Protocol: using the OECD GREEN Model*, In: OECD, 1998, *Economic Modelling of Climate Change*, OECD, Paris.

United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC (2001), *Report of the Conference of the Parties on its seventh session. Part two: Action taken by th Conerence of the Parties*, Decision 17/CP.7.

Zhang, Z.X. 1999, *Estimating the Size of the Potential Market for the Kyoto Flexibility Mechanism*, University of Groningen.