

► DIRECTION DES ETUDES ECONOMIQUES ET DE L'EVALUATION  
ENVIRONNEMENTALE

► DOCUMENT DE TRAVAIL

**EFFET DE SERRE :**  
**DOCUMENT DE BASE DE LA MAQUETTE**  
**SAGESSE**  
**( SIMULATION DES ALLOCATIONS DE GAZ A EFFET**  
**DE SERRE**  
**ET LEUR SYSTEME D'ECHANGE )**

**Eve ROUMIGUIERES**

**Série Etudes**  
**N° 01-E07**



Site internet : <http://www.environnement.gouv.fr>  
20 avenue de Ségur - 75302 Paris 07 SP

## ► RESUME

<p style="text-align: center;"><b>Document de base de la maquette SAGESSE</b> <b>( Simulation des Allocations de Gaz à Effet de Serre</b> <b>et leur Système d'Echange )</b> <b>Eve ROUMIGUIERES</b></p>
--

Dans le cadre de la mise en œuvre des mécanismes de flexibilité décrits dans le Protocole de Kyoto, la DEEEE s'est dotée d'une maquette de simulation dénommée SAGESSE (Simulation des Allocations de Gaz à Effet de Serre et de leur Système d'Echange), qui permet d'effectuer de façon simple des simulations de marché de permis international d'émissions de gaz à effet de serre.

Ce document est d'ordre méthodologique et a pour but d'expliquer les étapes de construction de la maquette, les hypothèses qui la sous-tendent et enfin son fonctionnement au travers de la prise en compte des différentes hypothèses définissant le marché d'échanges d'émissions de gaz à effet de serre. Sont repris pour exemple d'utilisation, la simulation et les résultats par SAGESSE de la situation de référence intégrant les dernières décisions prises lors de la Conférence des parties de novembre 2001 à Marrakech ainsi que les résultats d'une étude sur les taux d'effort réalisée à l'aide de SAGESSE.

Implantée sur tableur EXCEL, SAGESSE calcule un équilibre partiel sur le marché des droits à émettre du carbone, en égalisant les coûts marginaux de réduction des émissions des différents intervenants, sous contrainte que les objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre tels que fixés par le Protocole de Kyoto soient atteints. La résolution s'effectue grâce au solveur, macro d'EXCEL permettant de résoudre des équations sous contraintes.

La maquette offre la possibilité de choisir les pays ou régions accédant aux mécanismes de flexibilité. Le marché simulé peut être libre ou contraint par différents mécanismes que l'on peut combiner. Des limitations à l'achat ou la vente de permis peuvent ainsi être introduites ; la quantité de permis mise sur le marché par l'ex-URSS peut être limitée (limitation du « hot air ») ; les puits peuvent être introduits sous plusieurs scénarios ainsi que des coûts de transaction et de prélèvement sur les échanges. Il convient de noter que les objectifs d'émissions de CO<sub>2</sub> fixés par pays correspondent *a priori* aux engagements de Kyoto, mais peuvent aussi être modifiés par l'utilisateur, et même être le produit de la simulation.

La maquette SAGESSE s'avère ainsi être un outil simple, utile au MATE et aux négociateurs, afin de tester une multiplicité de scénarios et d'éclairer les négociations en cours sur les enjeux relatifs aux options en négociation. Cette maquette était d'ailleurs, dans une forme plus embryonnaire, à disposition de la délégation française dès la sixième Conférence des Parties (CoP 6) à La Haye en novembre 2000. La maquette présentée ici est une version mise au point après CoP 6 bis et CoP 7 en 2001.

*Ce document n'engage que son auteur et non les institutions auxquelles ils appartiennent. L'objet de cette diffusion est de stimuler le débat et d'appeler des commentaires et des critiques.*

# SOMMAIRE

<b><u>INTRODUCTION</u></b> .....	<b>4</b>
<b><u>1. PRESENTATION GENERALE DE SAGESSE</u></b> .....	<b>5</b>
1.1. <u>SPECIFICATIONS</u> .....	5
1.2. <u>FONCTIONNEMENT</u> .....	6
1.2.1 <u>Identification des onglets</u> .....	6
1.2.2 <u>Etapas de simulation d'un scénario</u> .....	7
<b><u>2. CONSTRUCTION DE LA MAQUETTE</u></b> .....	<b>8</b>
2.1. <u>LA LOGIQUE DE CONSTRUCTION</u> .....	8
2.2. <u>CHOIX DES COURBES DE COUT D'ABATEMENT ET DE LEUR PARAMETRAGE</u> .....	8
2.2.1 <u>Les courbes du modèle POLES</u> .....	8
2.2.2 <u>Approximation des courbes de coût d'abattement pour 2010</u> .....	9
2.3. <u>NOTATIONS ET FORMULES DE RESOLUTION DU MODELE IMPLICITE</u> .....	14
2.3.1 <u>Notations</u> .....	14
2.3.2 <u>Données exogènes</u> .....	14
2.3.3 <u>Formules de résolution</u> .....	15
<b><u>3. LES VARIANTES DE LA MAQUETTE</u></b> .....	<b>18</b>
3.1. <u>LA LISTE DES VARIANTES</u> .....	18
3.2. <u>MODELISATION DES VARIANTES</u> .....	18
3.2.1 <u>Choix des zones géographiques et leur rôle</u> .....	19
3.2.2 <u>Fixation d'objectifs de réduction des différents pays</u> .....	20
3.2.3 <u>Limitation du « Hot Air »</u> .....	21
3.2.4 <u>Plafond à l'achat <math>\Leftrightarrow</math> Supplémentarité</u> .....	22
3.2.5 <u>Prise en compte des puits de carbone (propositions Pronk I, III, Bonn et Marrakech)</u> .....	22
3.2.6 <u>Réserve de période d'engagement (CPR)</u> .....	23
3.2.7 <u>«Share of proceeds »</u> .....	24
3.2.8 <u>Taxe sur le marché de permis et la mise en œuvre conjointe</u> .....	25
<b><u>4. LA PRESENTATION DES RESULTATS</u></b> .....	<b>27</b>
<b><u>5. EXEMPLES D'UTILISATION</u></b> .....	<b>28</b>
5.1. <u>SIMULATION DE LA SITUATION DE REFERENCE DEPUIS LA CONCLUSION DE COP 7</u> .....	28
5.1.1 <u>Effet du « hot air » et scénario de référence</u> .....	28
5.1.2 <u>Résultats du scénario de référence</u> .....	30
5.2. <u>UNE ETUDE RETROSPECTIVE : EFFORT ECONOMIQUE REQUIS PAR LES PARTIES DANS LE CAS OU LES USA PARTICIPENT</u> .....	34
5.2.1 <u>Hétérogénéité des efforts requis par l'application du Protocole de Kyoto</u> .....	34
5.2.2 <u>Modification des objectifs en fonction des taux d'effort</u> .....	35
5.2.3 <u>Synthèse</u> .....	38
5.3. <u>UNE ETUDE PROSPECTIVE : ELEMENTS SUR LES ALLOCATIONS INTERNATIONALES DE REDUCTIONS D'EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE</u> .....	39
5.3.1 <u>Règle d'allocation proportionnelle à la richesse ou à la population du pays : quels engagements en quantités d'émissions ?</u> .....	40
5.3.2 <u>Règle d'allocation proportionnelle à la richesse ou à la population du pays : quels engagements en termes de coûts ?</u> .....	42
<b><u>CONCLUSION</u></b> .....	<b>45</b>
<b><u>ANNEXE A : OBJECTIFS DE REDUCTION DES EMISSIONS DE GES POUR LES PAYS DE L'ANNEXE B</u></b> .....	<b>46</b>
<b><u>ANNEXE B : LE MODELE POLES</u></b> .....	<b>47</b>
<b><u>ANNEXE C : DIFFERENTES EQUATIONS POUR 2010</u></b> .....	<b>49</b>
<b><u>ANNEXE D : LES PUIITS DE CARBONE</u></b> .....	<b>54</b>

## INTRODUCTION

La question du changement climatique est complexe sur de multiples plans : scientifique, diplomatique et économique. Les enjeux économiques en ce domaine se trouvent posés dès lors que la réduction des émissions de gaz à effet de serre nécessite la mise en œuvre de politiques potentiellement coûteuses. De manière plus précise, le protocole de Kyoto (1997) fixe des objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre pour la période 2008-2012. De plus, il prévoit la mise en œuvre de mécanismes dits « de flexibilité » dont l'inspiration directement économique vise à permettre de réduire le coût global des efforts demandés aux différentes Parties en permettant leur réallocation éventuelle. Ces mécanismes sont les suivants :

- un marché de permis entre pays ayant pris des engagements quantifiés et contraignants de limitation d'émissions (pays dits de l'Annexe I ou de l'Annexe B<sup>1</sup>) ;
- la mise en œuvre conjointe (MOC, ou joint implementation en anglais) entre les pays en transition et les autres pays de l'Annexe I. Sa traduction en terme de modélisation, est très semblable à celui du marché de permis et l'on ne distinguera pas dans ce document de travail les deux mécanismes ;
- le mécanisme de développement propre (MDP, ou *clean development mechanism* en anglais) entre pays en développement, Parties à la convention climat et pays de l'Annexe I.

Les discussions autour de ces mécanismes sont au cœur des négociations internationales sur le changement climatique. Il s'agit essentiellement de se mettre d'accord sur les modalités pratiques de mise en œuvre des mécanismes et sur la part que ces derniers doivent représenter dans l'effort général de chaque pays contre l'effet de serre. L'impact du MDP, mais également le respect de la contrainte environnementale globale, dépendront de façon cruciale des modalités pratiques de mise en œuvre (« observance »), en particulier vis à vis des exigences imposées pour faire respecter le principe d'additionnalité et éviter les fuites de carbone (problème des puits). On trouve en filigrane la question de la complémentarité, le protocole de Kyoto prévoyant que le recours à ces mécanismes doit venir « en complément des mesures prises au niveau national ». Enfin, il y a controverse sur les prélèvements. Le protocole de Kyoto prévoit en effet aussi l'instauration d'une « share of proceeds », basée sur les projets du MDP, devant contribuer à aider les pays en développement. La mise en place et l'utilisation éventuelles de prélèvements sur les autres mécanismes ont été évoquées.

L'analyse économique peut éclairer les négociations sur ces différents thèmes, qu'il est nécessaire de traiter séparément dans un premier temps, mais dont les interdépendances techniques et diplomatiques nécessitent ensuite une analyse globale. Pour cela, la simulation des mécanismes de flexibilité se révèle fort utile, non seulement pour quantifier ce qui peut l'être, mais pour faciliter la compréhension d'une analyse économique complexe.

La DEEEE a commencé pour ce faire par utiliser les modèles existants, puis a développé sa propre maquette de simulation, dénommée SAGESSE (Simulation des Allocations de Gaz à Effet de Serre et de leur Système d'Echange), qui permet

---

1 Voir Annexe A : Les objectifs de réduction des émissions de GES des pays de l'Annexe B.

d'effectuer de façon simple des simulations de marché de permis international d'émissions de gaz à effet de serre. Les deux derniers mécanismes (MOC et MDP) sont traités dans la maquette comme une simple déclinaison du premier mécanisme. La maquette SAGESSE s'avère ainsi être un outil simple, utile au MATE et aux négociateurs, afin de tester une multiplicité de scénarios et d'éclairer les négociations en cours. Cette maquette était d'ailleurs, dans une forme plus embryonnaire, en possession de la délégation française dès la sixième Conférence des Parties (CoP 6) à La Haye en novembre 2000, la maquette présentée ici étant la version mise au point après CoP 6 bis et CoP 7 en 2001.

Ce document a pour but d'expliquer les étapes de construction de la maquette, les hypothèses qui la sous-tendent et enfin son fonctionnement au travers de la prise en compte des différentes hypothèses définissant le marché d'échanges d'émissions de gaz à effet de serre.

## **PRESENTATION GENERALE DE SAGESSE**

### **SPECIFICATIONS**

SAGESSE doit permettre de simuler le fonctionnement des mécanismes de flexibilité. Pour ce faire, elle calcule un équilibre partiel sur le marché des droits à émettre du carbone, en égalisant les coûts marginaux de réduction des émissions des différents intervenants, sous contrainte que les objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre tels que fixés par le Protocole de Kyoto soient atteints. De plus, cette maquette doit être :

- simple d'utilisation, les futurs utilisateurs n'ont pas à apprendre un langage informatique, par exemple, pour la faire fonctionner ;
- facile à mettre à jour :
  - en ce qui concerne les jeux de données exogènes (afin de permettre la comparaison entre différents modèles macro-économiques) ;
  - en ce qui concerne les multiples scénarios résultant des hypothèses formulées puis des décisions des négociateurs ;
- évolutive, c'est à dire construite en pensant aux futures périodes d'engagement, il faut donc tenir compte du fait que des pays n'ayant pas d'objectifs chiffrés lors du Protocole de Kyoto pourraient en avoir par la suite et vice versa (rien n'indique que ces objectifs de réduction soient reconduits à l'identique, de même pour le mode fonctionnement du marché d'échanges).

Pour l'instant, la maquette utilise de façon exogène les courbes de coûts d'abattement marginaux d'émissions de CO<sub>2</sub> ainsi que les projections d'émission provenant du modèle POLES de l'IEPE (CNRS), modèle financé par le MATE (C.f: Annexe B). Pour cette raison, SAGESSE porte seulement sur le CO<sub>2</sub> énergétique (environ 70 % des émissions de gaz à effet de serre en France) et l'horizon temporel choisi correspond à la première période d'engagement du protocole de Kyoto (2008-2012).

La maquette offre la possibilité de choisir les pays ou régions accédant aux mécanismes de flexibilité. Le marché simulé peut être libre ou contraint par différents mécanismes que l'on peut combiner. Des limitations à l'achat ou la vente de permis peuvent ainsi être introduites ; un prix plafond peut être fixé ; des coûts de transactions et des coûts de prélèvement peuvent être imposés ; la quantité de permis mise sur le marché par l'ex-URSS peut être limitée (limitation du « hot

air ») ; les puits peuvent être introduits sous plusieurs scénarios ainsi que des prélèvements sur les échanges.

Il convient de noter que les objectifs d'émissions de CO<sub>2</sub> fixés par pays correspondent *a priori* aux engagements de Kyoto, mais peuvent aussi être modifiés par l'utilisateur et même être le produit de la simulation. Il est possible, par exemple, de fixer un taux d'effort souhaité pour chaque pays et d'examiner quelle combinaison d'objectifs de réduction des émissions sont compatibles avec ces coûts, sous diverses hypothèses (intégrité environnementale notamment).

Différents types de résultats sont calculés par la maquette : le prix du permis d'émission de CO<sub>2</sub> sur le marché ; les émissions réelles, les quantités achetées et vendues, et les quantités de réductions réalisées en interne pour chaque pays ou région.

## **FONCTIONNEMENT**

SAGESSE utilise le tableur EXCEL, ce logiciel étant le plus simple et le plus connu en terme d'utilisation, même s'il n'est pas le plus efficient en ce qui concerne différentes résolutions mathématiques.

La résolution s'effectue grâce au solveur, macro d'EXCEL permettant de résoudre des équations sous contraintes. L'utilisation des fonctionnalités d'EXCEL permet à la fois de simplifier l'utilisation et la lisibilité de la maquette en n'ayant pas toutes les étapes de calcul sur une même feuille et de protéger certaines données et / ou étapes nécessaires afin que l'utilisateur ne puisse, par mégarde, les effacer ou les modifier.

### **Identification des onglets**

SAGESSE est ordonnée en différentes étapes comportant autant d'onglets (ou feuilles) protégées ou non, masquées ou non.

Ainsi, les feuilles sont :

- **Mode d'emploi** : cette feuille est protégée en écriture et comporte la présentation de SAGESSE, les explications correspondantes au fonctionnement de la maquette ; elle donne accès étape par étape au fonctionnement simplifié de la maquette ;
- **Options** : cette feuille permet à l'utilisateur de définir le scénario qu'il veut tester.
- **Données2010P** : cette feuille est protégée en écriture et comporte les données exogènes utilisées et provenant de POLES pour l'horizon 2010. Par la suite, d'autres feuilles comportant d'autres jeux de données pourront être utilisées, l'utilisateur devant alors choisir quel jeu de données il veut utiliser.
- **Calculs, Calculs (2)** : sur ces feuilles se trouvent les étapes des calculs visant à effectuer la simulation du scénario ;
- **Résultats** : sur cette feuille, sont présentés tous les résultats du scénario testé ;

Suivent ensuite une série de feuilles relatives aux différentes hypothèses successivement utilisées dans les négociations :

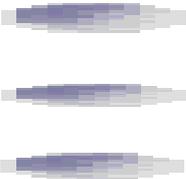
- **Puits CoP7** : cette feuille est protégée en écriture et reprend les données sur les puits de carbone telles qu'elles ont été fixées à Marrakech lors de CoP7 (novembre 2001), ces valeurs sont utilisées par défaut dans la maquette ;
- **Puits CoP6 bis** : cette feuille est protégée en écriture et reprend les données sur les puits de carbone telles qu'elles ont été fixées à Bonn lors de CoP6 bis (juillet 2001) ;

- Puits Pronk 1 : cette feuille est protégée en écriture et reprend les données sur les puits de carbone telles qu'elles avaient été fixées dans le premier papier du Président Pronk durant le premier trimestre 2001 ; *cette feuille est à l'heure actuelle masquée et n'est plus utilisée mais est utile si l'on veut comparer l'évolution de la prise en compte des puits de carbone au cours des dernières négociations.*
- Puits Pronk 3 : cette feuille est protégée en écriture et reprend les données sur les puits de carbone telles qu'elles avaient été fixées dans le papier du Président Pronk suivant ; *cette feuille est à l'heure actuelle masquée et n'est plus utilisée mais est utile si l'on veut comparer l'évolution de la prise en compte des puits de carbone au cours des dernières négociations.*
- Etape : cette feuille est masquée et permet de simplifier les calculs, l'utilisateur n'a a priori aucune raison de la consulter, cette feuille ne comportant que des étapes intermédiaires de calcul ;

#### Etapes de simulation d'un scénario

Le fonctionnement de SAGESSE pour l'utilisateur est le plus simple possible et, pour ce faire, utilise des icônes et/ou des boutons sur lesquels il doit cliquer afin de poursuivre.

L'utilisateur doit se rendre sur la feuille « Mode d'emploi » et se voit expliquer pas à pas le fonctionnement de la maquette. En haut de la feuille se trouvent regroupées les différentes étapes et leur accès est facilité (de même que la navigation dans la feuille) par des icônes et des boutons. Les icônes permettent de se positionner exactement là où se trouve l'option devant être spécifiée, en utilisant pour se faire des liens hypertextes. Trois choix sont disponibles :



choisir les options que vous voulez voir apparaître

mettre à jour la solution

regarder ou imprimer les résultats.

De plus, les hypothèses peuvent être vérifiées :



observer les données exogènes

observer les données exogènes sur les puits de carbone

obtenir des indications sur les hypothèses de construction de SAGESSE

Il faut noter que, tout au long du déroulement des étapes, l'utilisateur, s'il se pose des questions, peut cliquer sur des icônes en forme de point d'interrogation afin d'obtenir des informations. De plus, une icône lui permet de revenir systématiquement à l'étape précédente.

Pour faire fonctionner la maquette et tester un scénario, l'utilisateur doit choisir les options : elles sont présentées explicitement et la prise en compte par défaut est signalée. Ensuite, l'utilisateur peut mettre à jour la solution. Il se retrouve dans la feuille « Calculs » et doit alors lancer l'exécution du solveur. Pour ce faire, il doit sélectionner dans la barre d'outils et sélectionner « Outils » puis « Solveur ». Une fenêtre apparaît alors et l'utilisateur doit cliquer sur « Résoudre ». Un message apparaît qui précise si le solveur a trouvé une solution acceptable au problème posé<sup>2</sup>. Les deux messages sont : « Le solveur a trouvé une solution satisfaisant toutes les contraintes et les conditions d'optimisation. » et « Le solveur ne peut pas trouver de solution réalisable. ». Il suffit de cliquer sur « OK » afin d'accepter la solution trouvée par le solveur.

Si la solution ne lui paraît pas acceptable, il peut alors revenir en arrière et modifier les options. S'il veut continuer, l'utilisateur se retrouve dans la feuille « Calculs (2) » et doit de nouveau faire tourner le solveur comme précédemment. En dernier lieu, l'utilisateur peut consulter dans la feuille « Résultats », les résultats provenant du scénario testé.

## **CONSTRUCTION DE LA MAQUETTE**

### **LA LOGIQUE DE CONSTRUCTION**

La maquette construite par la DEEEE doit permettre d'effectuer de façon simple des simulations de marchés de permis, dans le cadre de la lutte contre le changement climatique. Implantée sur tableur EXCEL, elle calcule un équilibre sur le marché des droits à émettre du carbone en cherchant le prix auquel les coûts marginaux des différents participants au marché sont égaux, et qui vérifie donc que la somme des échanges est nulle. Pour cela, il est tout d'abord nécessaire de connaître les courbes de coût d'abattement, puis de bien poser les conditions d'équilibre et les contraintes en fonction des cas modélisés.

### **CHOIX DES COURBES DE COUT D'ABATTEMENT ET DE LEUR PARAMETRAGE**

SAGESSE utilise comme données principales les courbes de coûts d'abattement marginaux d'émissions de carbone provenant du modèle POLES de l'IEPE (CNRS). Pour simplifier les calculs, ces courbes ont été estimées par des expressions analytiques paraboliques ce qui ne modifie les résultats que très marginalement.

#### **Les courbes du modèle POLES**

Les séries de données de POLES pour chaque région étudiée partent d'une valeur d'émission prévue pour 2010. Il s'agit de la valeur « 0 ». Ensuite, un montant d'émission est donné incluant les réductions effectuées avec un prix de 10 dollars par tonnes de carbone. Ce processus se répète de 10 en 10 dollars jusqu'à 600 dollars. Il ne s'agit donc pas d'une courbe mais d'une série de points.

Par exemple, pour les Etats Unis :

<b>Prix</b>	<b>0</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	<b>.....</b>	<b>580</b>	<b>590</b>	<b>600</b>
-------------	----------	-----------	-----------	-----------	-----------	--------------	------------	------------	------------

<sup>2</sup> Il peut exister des scénarios pour lesquels le prix d'équilibre est négatif ou nul, cette solution est jugée, de par les conditions préalables de résolution du problème formulé comme non acceptable.

POLES	1716	1668	1624	1581	1541	.....	783	778	773
Points de la courbe	0	48	92	135	175	.....	933	938	943

L'utilisation de ces séries de points est malaisée dans EXCEL car elle complexifie les formules utilisées. C'est pourquoi leur remplacement par une équation de forme parabolique, autrement dit l'approximation d'une courbe repérée par une série de points avec deux, voire trois paramètres pour chaque région étudiée a permis un maniement plus aisé de la maquette.

### Approximation des courbes de coût d'abattement pour 2010

#### *Choix du modèle*

Pour les équations<sup>3</sup>, outre la forme du modèle à prendre en compte (équation parabolique d'ordre 2 avec ou sans constante), le problème est de savoir quelle plage de prix doit être considérée afin que les courbes estimées approchent au mieux les courbes originales sur la plage de prix qui nous semble la plus importante, c'est-à-dire proche du prix d'équilibre du marché de permis.

Différents modèles pour quelques régions clés ont été construits sur différentes plages de prix (C. f. : Annexe C). La valeur des coefficients n'est modifiée que marginalement par la prise en compte du point « 0 ». Par contre, la borne supérieure a une incidence plus forte. En effet, les valeurs des coefficients semblent être très fortement dépendantes de la borne supérieure, un cap semblant atteint à partir d'un prix de 300 dollars. Les résultats obtenus auparavant par différentes modélisations<sup>4</sup> montrent que pour un scénario en 2010, le prix du permis est inférieur à 100 dollars dans tous les cas. La partie de la courbe que nous voulons la plus proche possible des points de POLES est donc comprise entre 0 et 100 dollars. Or, les quantités étant calculées seulement pour des prix allant de 10 en 10 dollars, le nombre de points (11 en utilisant le point « 0 ») n'est pas suffisant pour élaborer un modèle robuste. La borne supérieure finalement retenue pour estimer les courbes fut donc de 200 dollars.

Au vu des résultats, il semblerait que les modèles sans constante soient préférables, les statistiques étant meilleures pour la majorité des régions étudiées.

#### *Les équations pour les différentes régions*

Les modèles sont de la forme  $P = a Q + b Q^2$  où P représente le prix en dollars de 1990 et Q la quantité de réduction d'émission en tonnes de carbone. Les chiffres fournis entre parenthèses sont la valeur de la statistique de Student<sup>5</sup> associée à chaque coefficient. Le  $R^2$  ajusté est le coefficient de corrélation utilisé lorsque le modèle testé ne possède pas de constante ; sa valeur doit être proche de 1.

#### Pour le continent américain :

Etats Unis	P =	0,16358	Q +	0,00030232	Q <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajusté = 0,9998
		(36,23)		(31,96)		
Canada	P =	3,60034	Q +	0,06548	Q <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajusté = 0,9997
		(40,24)		(20,27)		
Brésil	P =	2,57256	Q +	0,11381	Q <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajusté = 0,9996
		(24,83)		(28,78)		
Mexique	P =	3,1783	Q +	0,06861	Q <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajusté = 0,9996

<sup>3</sup> Les coefficients ont été obtenus en utilisant le logiciel SAS et en recourant à l'économétrie. En Annexe C, se trouvent les différents programmes informatiques utilisés.

<sup>4</sup> Principalement en utilisant ASPEN de l'IEPE et la maquette de Martin Guespèreau développée pour la D4E à partir des données du modèle EPPA du MIT.

<sup>5</sup> La statistique de Student permet de tester l'hypothèse selon laquelle le coefficient est égal à zéro. Dans ce cas, la variable serait non significative. Si la valeur de la statistique est hors de l'intervalle [-1,86 ; +1,86], le coefficient est à 95 % différent de zéro.

		(32,36)		(20,15)		
Reste de l'Amérique centrale	P =	12,04263	Q +	0,42677	Q <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajusté = 0,9982
		(18,98)		(6,35)		
Reste de l'Amérique du sud	P =	-2,0957	Q +	0,20762	Q <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajusté = 0,9944
		(-4,77)		(14,5)		
<u>Pour l'Europe :</u>						
France	P =	6,92006	Q +	0,26948	Q <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajusté = 0,9989
		(20,76)		(11,3)		
Allemagne	P =	1,4344	Q +	0,02126	Q <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajusté = 0,9996
		(28,17)		(23,42)		
Italie	P =	9,24747	Q +	0,22475	Q <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajusté = 0,999
		(25,94)		(7,95)		
Grande Bretagne	P =	2,23016	Q +	0,06361	Q <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajusté = 0,9998
		(36,81)		(35,24)		
Reste de l'Union Européenne						
- Nord	P =	2,64991	Q +	0,0533	Q <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajusté = 0,9998
		(44,58)		(30,02)		
- Sud	P =	3,10533	Q +	0,07842	Q <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajusté = 0,9997
		(33,49)		(23,65)		
Reste de l'Europe de l'Ouest	P =	24,16095	Q +	1,58848	Q <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajusté = 0,9915
		(9,19)		(2,88)		
Fédération de Russie						
- Annexe B	P =	0,40098	Q +	0,00249	Q <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajusté = 0,9997
		(26,96)		(29,21)		
- non Annexe B	P =	1,8098	Q +	(0,0511	Q <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajusté = 0,9996
		(24,46)		(26,64)		
Pol, Hon, Tchech, Slov	P =	1,52177	Q +	0,01479	Q <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajusté = 0,9997
		(38,15)		(22,75)		
Reste de l'Europe centrale						
- Annexe B	P =	5,55677	Q +	0,3319	Q <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajusté = 0,9983
		(12,85)		(10,95)		0,9983
- non Annexe B	P =	10,05559	Q +	0,95273	Q <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajusté = 0,9972
		(10,65)		(8,3)		
Turquie	P =	1,0858	Q +	0,1936	Q <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajusté = 0,9984
		(4,16)		(17,99)		
<u>Pour l'Afrique et le Moyen Orient :</u>						
Pays de la Méditerranée	P =	7,075	Q +	0,75805	Q <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajusté = 0,998
		(10,54)		(11,25)		
Afrique (Sud du Sahara)	P =	0,32248	Q +	0,00839	Q <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajusté = 0,9978
		(4,82)		(14,05)		
Pays du Golfe	P =	1,37985	Q +	0,04463	Q <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajusté = 0,9997
		(23,13)		(32,55)		
Egypte	P =	11,29433	Q +	1,08156	Q <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajusté = 0,9965
		(9,99)		(7,24)		
Pays d'Afrique du Nord						
- exportateurs de pétrole	P =	5,17943	Q +	1,54469	Q <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajusté = 0,9955
		(4,12)		(9,88)		

- non exportateurs de pétrole P = 55,21739 Q R<sup>2</sup> ajusté = 0,9762  
(29,39)

Pour l'Asie et l'Océanie :

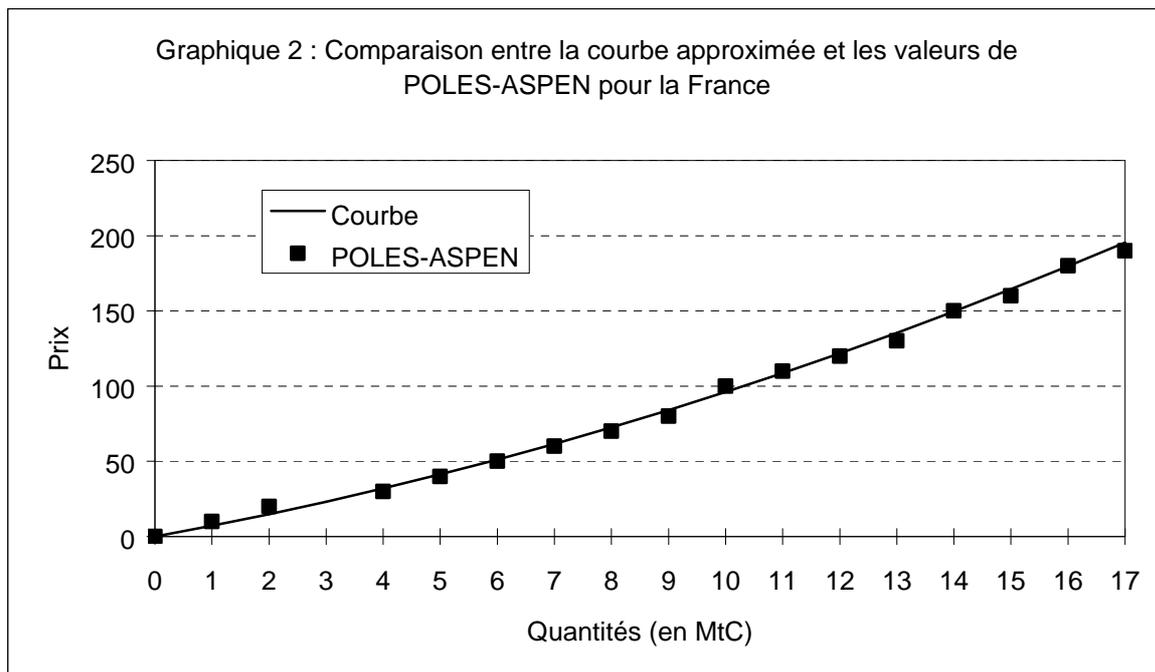
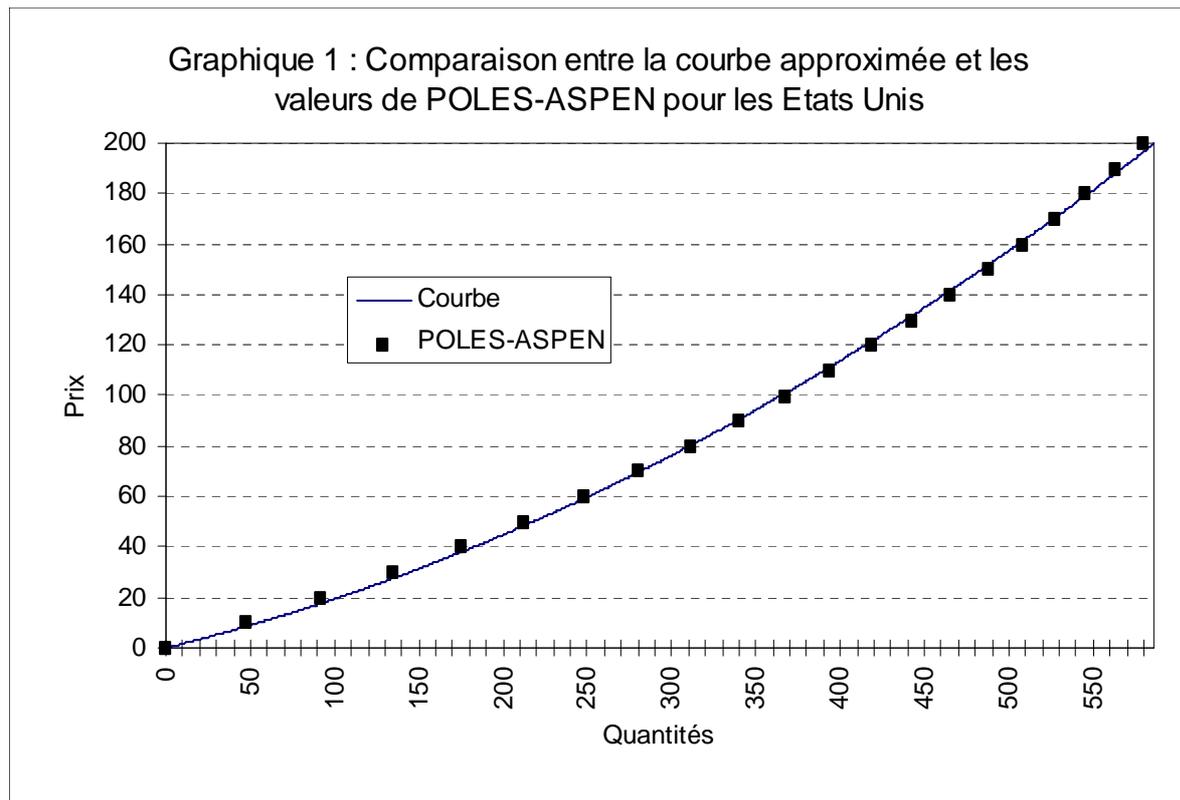
Australie + Nouvelle Zélande	P = 1,81383 (20,61)	Q + 0,04076 (19,32)	Q <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajusté = 0,9994
Japon	P = 1,64253 (44,55)	Q + 0,01988 (29,38)	Q <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajusté = 0,9998
Chine	P = 0,00236 (0,28)	Q + 0,00029037 (23,92)	Q <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajusté = 0,9987
Inde	P = 0,75215 (101,97)	Q + 0,00372 (62,07)	Q <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajusté = 1
Corée	P = 3,84815 (28,13)	Q + 0,10201 (17,69)	Q <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajusté = 0,9995
Reste du sud-est asiatique	P = 0,58367 (16,17)	Q + 0,00823 (23,19)	Q <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajusté = 0,9994
Reste de l'Asie du sud	P = 6,61194 (24,93)	Q + 0,24946 (13,71)	Q <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajusté = 0,9993

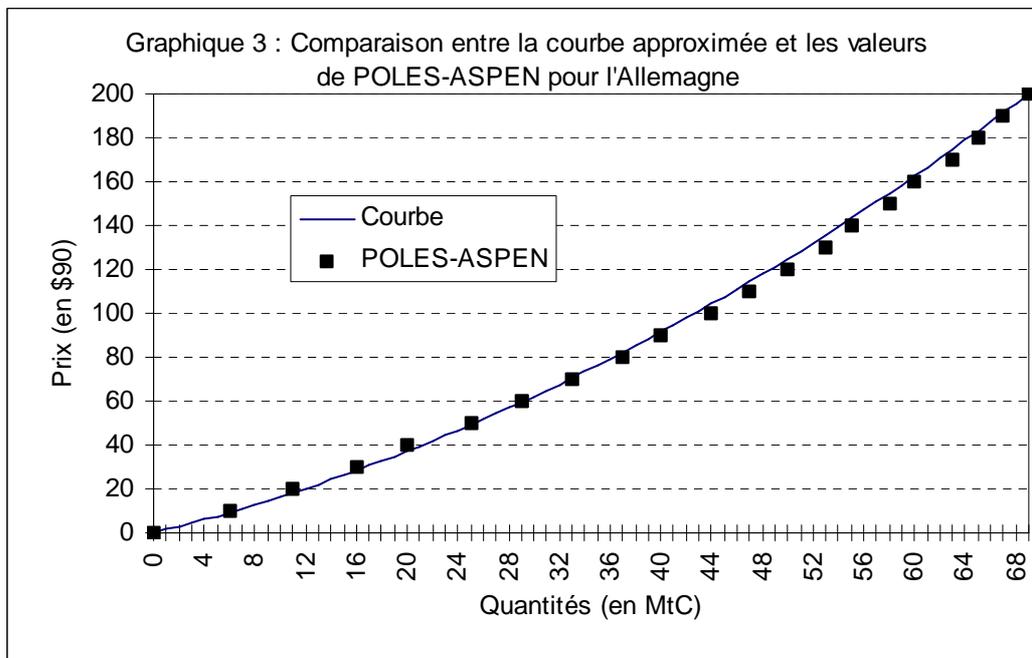
*Test des résultats*

*Comparaison des coûts domestiques totaux*

	Coût domestique total En millions de dollars de 1990		Ecart	
	POLES	Calculé	en %	en M \$
Etats Unis	29636	29375	-0,9	-261
Canada	2181	2194	0,6	12
Australie et Nouvelle Zélande	1700	1648	-3,1	-52
Japon	5463	5442	-0,4	-21
France	1350	1334	-1,2	-16
Allemagne	643	583	-9,3	-60
Italie	2454	2449	-0,2	-5
Grande Bretagne	1274	1264	-0,8	-10
Reste de l'Union Européenne du nord	8763	8523	-2,7	-239
Reste de l'Union Européenne du sud	680	668	-1,8	-12
Reste de l'Europe de l'Ouest	619	612	-1,1	-7
Pol, Hon, Tchéc, Slov	256	229	-10,4	-26
Reste de l'Europe centrale (Annexe B)	9	8	-14,5	-1

Pour la plupart des pays, l'erreur observée est relativement restreinte. Néanmoins, certaines différences sur l'Allemagne et les Etats Unis ont nécessité une analyse un peu plus poussée.





Si les valeurs des coûts domestiques totaux sont relativement différentes, les courbes par contre sont relativement proches. Au vu de ces graphiques, décision a été prise d'utiliser dans SAGESSE, les valeurs des paramètres obtenues par le biais de ces équations.

Des estimations similaires seront menées pour des horizons plus éloignés que 2010 dès que des équipes de modélisation du secteur de l'énergie fourniront des jeux de données adaptés.

## NOTATIONS ET FORMULES DE RESOLUTION DU MODELE IMPLICITE

### Notations

Le but de l'exercice est de décrire selon les régions des fonctions de coût. A la différence d'une fonction classique où le coût est fonction de la quantité d'un bien unique produit, notre coût (ou plutôt le prix) est fonction de la réduction de la quantité produite. Il faut donc payer pour réduire les émissions : en corollaire, on ne s'intéresse qu'au coût de la réduction des émissions par rapport à une situation de référence où ces émissions ont lieu.

Toutes les variables utilisées le sont pour chaque pays ou région notée « r ». L'unité de mesure de réductions d'émissions est le million de tonnes de carbone (MtC), et l'unité de prix est le million de dollars en volume, année de base 1990 (M\$90). Lorsqu'un prix (coût moyen ou coût marginal) est indiqué, il est exprimé en M\$90/MtC donc en \$90/tC.

Le temps prend plusieurs valeurs repérées par « 0 », « 1 » ou « 2 » :

- « 0 » représente le point de départ. Pour la première période d'engagement, la référence est généralement l'année 1990.
- « 1 » la première période d'engagement (2008-2012) ou l'année 2010. En fait, l'année 2010 est supposée représenter la moyenne de la période 2008-2012.
- « 2 » représente les données relativement à 2030.

Les autres notations relatives à la maquette sont les suivantes, où l'on a enlevé l'indice « t » pour alléger les notations :

- $P$  : le prix du permis d'émettre une tonne de carbone
- $P^*$  : le prix d'équilibre du marché de permis
- $PIB^r$  : les PIB en 1990 et 2010 (ou 2030) pour chaque région « r »
- $POP^r$  : population en 1990 et 2010 (ou 2030) pour chaque région « r »
- $E^r$  : les émissions de la région « r »
- $E_K^r$  : les engagements d'émissions de la région « r » selon le Protocole de Kyoto pour la période 2008-2012
- $k^r$  : pourcentage de réduction des émissions de la période de référence selon le Protocole de Kyoto
- $C^r(Q^r)$  : fonction de coût marginal d'abattement
- $a^r, b^r$  : paramètres des courbes de coût marginal d'abattement de la région « r »
- $Q^r$  : réduction d'émissions de gaz à effet de serre de « r » avec :
  - $Q_{max}^r$  : quantité dite maximale de réduction d'émissions : quantité à réaliser s'il n'y a pas de marché de permis
  - $Q_D^{r*}$  : quantité des réductions d'émissions obtenue en interne pour un prix de marché d'équilibre  $P^*$  ;
  - $Q_F^{r*}$  : quantité des réductions d'émissions obtenue via un marché de permis pour un prix de marché d'équilibre  $P^*$ .
- $C_F^{r*}$  : solde du coût des échanges de permis pour la région « r »
- $C_D^{r*}$  : coût domestique pour la région « r » lorsqu'elle réduit ses émissions de  $Q_D^{r*}$
- $C_T^{r*}$  : coût total pour la région « r » de la lutte contre le changement climatique

### Données exogènes

Toutes les variables utilisées le sont pour chaque pays ou région notée « r ».

### *Croissance et population*

Ces chiffres servent d'indicateurs, mais n'interviennent pas dans le calcul proprement dit. Ils peuvent servir à normer les résultats (par exemple, exprimer un coût relativement au PIB pour le taux d'effort, ou les émissions relativement à la population) et devraient servir lors de l'élaboration de variantes possibles (% d'émissions par tête, ...).

Sont donnés les chiffres de croissance en 1990 et 2010 (ou 2030) pour chaque pays ou région notés :  $PIB_0^r$  et  $PIB_1^r$  (ou  $PIB_2^r$ ).

Sont fournies les données de population en 1990 et 2010 (ou 2030) pour chaque pays ou région notés respectivement :  $POP_0^r$  et  $POP_1^r$  (ou  $POP_2^r$ ).

### *Les montants d'émissions de gaz à effet de serre*

Il existe trois types de références pour les émissions de gaz à effet de serre :

- les émissions de 1990 qui servent de référence notées :  $E_0^r$
- les émissions de référence de l'année médiane de la fin de période d'engagement 2010 (ou 2030) notées :  $E_1^r$  (ou  $E_2^r$ ). Ce sont les émissions qui se produiraient si aucune action de lutte contre l'effet de serre n'était entreprise.
- le montant des émissions devant être atteint en fin de période d'engagement noté :  $E_K^r$ . Cet engagement a été souscrit lors du Protocole de Kyoto sous forme de pourcentage des émissions de 1990 (soit «  $k^r$  »), puisque celles-ci risquaient d'être révisées :

$$\Rightarrow E_K^r = k^r / 100 \cdot E_0^r$$

Dans le cadre de la maquette,  $E_0^r$  est une donnée fixe, donc  $E_K^r$  est exogène.

### *Les paramètres des courbes de coût marginal d'abattement*

Les courbes de coût marginal d'abattement pour chaque pays ou région sont de la forme :

$$C^r(Q^r) = P^r = a^r \cdot Q^r + b^r \cdot (Q^r)^2$$

où  $P^r$  représente le prix (en dollar 1990 par tonne de carbone) dépensé à la marge dans la région  $r$ , et  $Q^r$  la réduction du montant d'émission de fin de période d'engagement (en millions de tonne de carbone) et  $C^r(Q^r)$  la fonction de coût marginal d'abattement (Cf : §2.2. Choix des courbes de coût d'abattement).

### Formules de résolution

Afin de pouvoir comparer les résultats obtenus, à une situation de référence unique, sont pris en considération les résultats obtenus s'il n'y avait pas de marché d'échanges et que les réductions d'émissions de gaz à effet de serre devaient être effectuées uniquement en interne pour chaque région.

### *Sans marché de permis*

Dans ce cas précis, les pays de l'Annexe B doivent respecter leurs engagements sans recourir à un mécanisme de flexibilité. Toutes les réductions de leurs montants d'émissions doivent être obtenues par le biais de réductions internes.

Il nous faut donc calculer la quantité de réduction d'émissions pour chacun des pays, le prix maximum supporté par chaque pays ou région et le coût total des réductions effectuées seulement en interne.

### Quantité et prix « maximum » supportés en interne

La quantité de réduction maximale d'émissions est la différence entre les émissions du pays telles qu'elles sont projetées pour la fin de période d'engagement et celles qui correspondent à l'engagement souscrit, soit :

$$Q_{\max}^r = E_1^r - E_K^r$$

Cette quantité est dite maximale puisque l'on suppose que chaque région ne va pas au-delà de l'engagement qu'elle a souscrit dans le Protocole. Lorsque les marchés de permis fonctionnent, un pays acheteur réalise moins de réduction que  $Q_{\max}^r$ , alors qu'un pays vendeur en réalise davantage.

### Coût domestique maximum

Le coût domestique maximum est représenté le coût des réductions effectuées totalement en interne. Le résultat est donc l'intégrale de l'équation de coût marginal d'abattement soit :

$$CD_{\max}^r = \int_0^{Q_{\max}^r} C_r(Q) dQ = a^r \cdot \frac{(Q_{\max}^r)^2}{2} + b^r \cdot \frac{(Q_{\max}^r)^3}{3}$$

### Avec marché de permis

L'inconnue principale est le prix d'équilibre du marché ( $P^*$ ) permettant de savoir quelle quantité de réduction sera effectuée en interne et quelle quantité sera achetée via ce marché. En effet, le pays a un intérêt financier à effectuer des réductions en interne jusqu'à ce que son coût marginal de réduction atteigne pour la région  $r$  la valeur du prix d'équilibre, et à acheter des permis si son coût marginal interne de réduction est supérieur à cette valeur.

### Quantité de réduction d'émissions

La quantité globale de réductions d'émissions devant être entreprises pour respecter l'engagement est égale à :

$$Q_{\max}^r = E_1^r - E_K^r$$

Mais ces réductions peuvent être effectuées sur le sol national ou par transfert de permis.

$$\Leftrightarrow Q_{\max}^r = Q_D^{r*} + Q_F^{r*} \text{ où :}$$

→  $Q_D^{r*}$  représente la quantité des réductions d'émissions réalisée en interne pour un prix de marché d'équilibre  $P^*$ .

→  $Q_F^{r*}$  représente la quantité des réductions d'émissions obtenue via un marché de permis pour un prix de marché d'équilibre  $P^*$ . Si  $Q_F^{r*}$  est positive, il y a achat. Si  $Q_F^{r*}$  est négative, il y a vente de la région  $r$ .

La quantité maximale des réductions d'émissions obtenues en interne est obtenue par résolution de l'équation :

$$P^* = a^r \cdot Q_D^{r*} + b^r \cdot (Q_D^{r*})^2$$
$$\Leftrightarrow Q_D^{r*} = \frac{-a^r + \sqrt{(a^r)^2 + 4 \cdot b^r P^*}}{2 \cdot b^r}$$

La quantité de réduction d'émissions acquise via un marché de permis pour un prix de marché d'équilibre  $P^*$  est donc égale à :

$$Q_F^{r*} = Q_{\max}^r - Q_D^{r*}$$

### Le prix d'équilibre du marché

Pour trouver le prix d'équilibre du marché d'échanges, il faut que les quantités de permis offertes soient égales aux quantités demandées (offre = demande). Ainsi, cela revient à résoudre :

$$\begin{aligned} \sum_r Q_F^{r*} &= 0 \\ \Leftrightarrow \sum_r (Q_{\max}^r - Q_D^{r*}) &= 0 \\ \Leftrightarrow \sum_r (E_L^r - E_K^r - \frac{-a^r + \sqrt{(a^r)^2 + 4 \cdot b^r P^*}}{2 \cdot b^r}) &= 0 \end{aligned}$$

sous contrainte que  $P^*$  soit strictement positif. Cette équation admet généralement une seule solution.

### Indicateurs de comparaison

Une fois établie la valeur précise de  $P^*$ , il est possible de l'utiliser pour décrire l'équilibre.

Le coût domestique est donc de :

$$C_D^{r*} = a^r \cdot \frac{(Q_D^{r*})^2}{2} + b^r \cdot \frac{(Q_D^{r*})^3}{3}$$

et le coût (d'abattement) lié aux échanges de permis est de :

$$C_F^{r*} = P^* \cdot Q_F^{r*}$$

Le coût total est de :

$$C_T^{r*} = C_D^{r*} + C_F^{r*}$$

## LES VARIANTES DE LA MAQUETTE

Les variantes sont les options d'encadrement du fonctionnement du marché de permis existantes ou envisagées. Néanmoins, afin d'avoir la meilleure flexibilité, d'autres options ont aussi été ajoutées. Outre la prise en compte des puits de carbone selon certains scénarios, il est ainsi possible de redéfinir les objectifs de réduction, mais surtout de choisir les pays participant au marché. Cette option s'est révélée fort utile lors de l'annonce par les Etats-Unis de leur retrait du Protocole.

Ces variantes peuvent intervenir à de nombreuses étapes des calculs. Les plus simples sont celles qui concernent les émissions (les puits de carbone, le *hot air*). Il existe aussi des contraintes pesant sur les quantités d'offre ou de demande et des contraintes pesant sur le fonctionnement du marché et donc le prix d'équilibre (comme un taux de taxation) et la constitution des différents fonds.

Il existe aussi deux possibilités d'application des variantes :

- soit elles concernent tous les pays sélectionnés (y compris le *hot air* puisque de toute façon le pays concerné est toujours le même),
- soit elles sont différenciées selon les pays (ou plutôt les zones comme l'Union Européenne).

Il faut, pour le confort de l'utilisateur, se laisser la possibilité d'avoir pour chaque variante une fixation en million de tonnes, équivalent carbone et une autre sous forme de taux. De plus, un taux peut être associé à diverses possibilités (émissions 2010 moins cible, émissions de 1990 moins cible, émissions de 2010, émissions 1990, ....), il faut donc prévoir différentes applications pour un taux donné.

### LA LISTE DES VARIANTES

En premier lieu, il a fallu élaborer une liste des variantes à modéliser dans SAGESSE et les traduire par la suite sous forme d'équations. La liste exhaustive est :

- Choix des zones géographiques et de leur rôle ;
- Fixation d'objectifs de réduction différents de ceux du protocole de Kyoto ;
- Limitation du *hot air* ;
- Plafond à l'achat (non différencié selon les régions) ou complémentarité ;
- Prise en compte des puits de carbone ;
- Réserve de période d'engagement ou CPR<sup>6</sup> pour les pays vendeurs uniquement<sup>7</sup> ;
- *Share of proceeds* s'appliquant au mécanisme de développement propre ;
- Taxe sur le marché de permis et la mise en œuvre conjointe pouvant être étendue au même niveau ou au même taux au mécanisme de développement propre.

### MODELISATION DES VARIANTES

La maquette SAGESSE est par vocation évolutive. La liste des variantes présentée ici est exhaustive à ce jour et tous les cas traités dans les différentes versions de la

---

<sup>6</sup> CPR signifie Commitment Period Reserve (C.f. : §3.2.6. pour une explication de ce terme et de ses conséquences).

<sup>7</sup> Cette option n'aurait pas de sens dans la maquette SAGESSE pour les pays acheteurs, puisque la maquette fonctionne en situation d'équilibre.

maquette sont explicités. Néanmoins, les dernières versions de SAGESSE, élaborées respectivement après CoP6 bis (juillet 2001) et CoP7 (novembre 2001), ont vu des modifications importantes intervenir (fixation de taux, abandon de certaines hypothèses, ...). La version la plus récente de SAGESSE ne prenant plus en compte l'intégralité de ces variantes, leur absence dans la version de SAGESSE la plus récente est alors précisée.

Pour chaque variante, la présentation ici faite propose une introduction de la problématique, une traduction formelle dans le modèle implicite à la maquette, une traduction pratique dans les options proposées par SAGESSE.

### Choix des zones géographiques et leur rôle

#### *Logique / Hypothèse*

Il est possible que certains pays de l'Annexe B ne ratifient pas *in fine* le Protocole de Kyoto. Dans ce cas, ils ne pourraient participer au marché d'échanges de permis d'émissions négociables. De plus, la maquette doit pouvoir évoluer et ne pas subir de nombreuses modifications pour simuler les échanges intervenant en deuxième période d'engagement.

Si on peut espérer à terme obtenir un système mondial, des simulations sont nécessaires afin d'observer les modifications si un pays de l'Annexe B est exclu ou déclaré inéligible, ou si l'on veut tester une variante avec ou sans la prise en compte du mécanisme de développement propre. Cette maquette devant évoluer, il est aussi tout à fait possible que certains pays, considérés au départ hors Annexe 1 donc ne pouvant participer qu'au mécanisme de développement propre aient à terme des objectifs de réduction et de ce fait participent aux échanges de permis. Cette possibilité est particulièrement intéressante pour la maquette à l'horizon 2030.

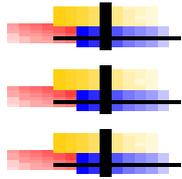
Pour ces deux raisons, il est nécessaire que tous les pays soient pris en compte et puissent être définis en fonction de leur participation éventuelle au marché d'échanges soit en tant qu'acteur, soit en tant que pays hôtes pour des projets utilisant le mécanisme de développement propre.

#### *Résolution*

Ces possibilités ont été relativement simples à mettre en place. Les formules de calculs différentes (pas de prise en compte d'objectifs pour les pays hôtes, aucune participation) sont conditionnées par un simple choix (« 1 » pour participant au marché d'échanges, « M » pour pays hôte, rien pour les pays ne participant pas).

Néanmoins, il serait fastidieux pour les utilisateurs d'entrer eux-mêmes et pour chaque pays ou ensemble de pays ces spécifications. En présélection, ont donc été établies des bulles permettant ainsi de gagner du temps. Elles ont été déterminées en fonction de l'actualité des négociations.

**Choix des zones géographiques et de leur rôle**



**Bulles pré-définies**

**Modifier les bulles**

**Retour**

Pour faciliter la saisie, il est conseillé de partir d'une bulle prédéfinie et, ensuite, si vous voulez la modifier, de cliquer sur le bouton "Modifier les bulles" afin d'effectuer vos modifications.

Dans le cas du choix d'utilisation d'une bulle pré-définie, apparaît à l'écran :

**Pour sélectionner un ensemble de pays**

Renseigner une seule de ces cases avec "1"



**Modifier les bulles**

- ? Union Européenne seule
- ? Tous les pays de l'Annexe B
- ? Tous les pays de l'Annexe B hors USA
- ? Tous les pays de l'Annexe B hors USA et Canada ? avec MDP ?
- ? Tous les pays de l'Annexe B hors USA, Canada et Japon

Si l'on désire modifier la bulle présélectionnée ou définir une bulle entièrement différente, apparaît à l'écran :

**Si vous voulez définir une bulle différente**

Taper en face de chacun des pays ou groupe de pays que vous voulez prendre en compte :

- 1 pays participant au marché d'échange de permis
- M pays hôte pour MDP

		Récapitulatif
		Ne rien inscrire
Pays	Rôle	Rôle

Fixation d'objectifs de réduction des différents pays

*Logique / Hypothèse*

Cette option répond aux besoins d'évolution de SAGESSE dans le cadre de la deuxième période d'engagement (modifications des engagements de réduction, objectifs fixés pour des pays qui initialement n'en avaient pas). Elle peut aussi être utile si l'on souhaite tester une modification du «burden sharing» (bulle européenne). En effet, l'Union Européenne possède un objectif de réduction de 8 % de ses émissions de gaz à effet de serre par rapport à celles de 1990. Tous les pays de l'Union Européenne avaient alors le même objectif. Or, après négociations à l'intérieur de la bulle européenne, de nouveaux objectifs ont été établis notamment sur la base des montants d'émission fournis à cette époque de manière à ce que l'objectif de réduction pour l'ensemble de l'Union Européenne soit respecté. Les

montants des émissions pour l'année 1990 ayant été révisés depuis, cet objectif global de réduction n'est plus respecté à l'heure actuelle (-7,8 % au lieu de -8 %<sup>8</sup>).

#### Résolution

Si un objectif différent est sélectionné, il sera pris en compte obligatoirement dans le calcul pour le pays considéré. Pour les autres régions, sera pris en compte un objectif de réduction par défaut : celui fixé par le Protocole de Kyoto s'il y en a un, ou aucun.

#### Présentation dans SAGESSE

**Si vous voulez définir des objectifs de réduction différents de ceux définis dans le Protocole de Kyoto, vous pouvez renseigner dans la colonne 'Nouvel objectif' le % de réduction voulu pour un ou plusieurs pays (ou groupe de pays) :**

		<b>Récapitulatif, ne rien inscrire</b>
Pays	Nouvel objectif	Objectif de Kyoto

La dernière colonne permet de bien identifier les pays pour lesquels il existe déjà un objectif de réduction et de quel niveau.

#### Limitation du « Hot Air »

##### Logique / Hypothèse

On estime que lors de l'élaboration des objectifs de Kyoto, n'a pas été prise en compte la récession industrielle ayant frappé la Fédération de Russie. La masse de réduction d'émissions potentielle en découlant est nommée "hot air" ou air chaud. En l'absence de données officielles pour ce pays - le dernier inventaire connu date de 1996 - il est difficile d'estimer l'importance réelle de cette masse de crédits d'émission disponible (entre 150 et 350 million de tonnes de carbone selon les modèles de projection, 324 millions de tonnes de carbone dans SAGESSE, données fournies par POLES).

Or, le *hot air* peut poser un problème pour la résolution de certains scénarios dans la maquette. En effet, pour certaines variantes, sa prise en compte en totalité empêche toute résolution (baisse du prix du permis jusqu'à un niveau nul ou même négatif, ce qui s'interprète comme le fait que les engagements de Kyoto seraient respectés sans intervention au nom de l'effet de serre).

Il est cependant probable que la Fédération de Russie préfère conserver une partie de ses crédits afin de les utiliser plutôt en deuxième période d'engagement, ce qui rend les scénarios de prise en compte intégrale du *hot air* dès la première période peu réalistes.

#### Résolution

Il existe deux possibilités pour la limitation du *hot air* dans la maquette : en pourcentage ou en million de tonnes de carbone. Pour la résolution, il est préférable d'avoir un pourcentage de limitation. Donc si celui-ci est spécifié en millions de tonnes, une étape intermédiaire le convertit automatiquement sous forme de pourcentage.

Soit  $h$ , le pourcentage affecté à la réduction du *hot air*, la résolution devient :

$$Q_{\max}^{\text{Féd de Russie}} = (E_{\text{I}}^{\text{Féd de Russie}} - E_{\text{K}}^{\text{Féd de Russie}}) \cdot h/100$$

Les autres calculs sont identiques à ceux utilisés pour tous les autres pays.

<sup>8</sup> La maquette utilisant les données POLES ne concernant que les émissions de dioxyde de carbone, l'objectif de réduction pour l'Union Européenne est de 8,4 %, de même, pour l'ensemble des pays de l'Annexe B, on obtient une réduction globale de 4,7 % au lieu de 5,2 % qui concerne l'ensemble des gaz à effet de serre.

## Présentation dans SAGESSE

Entrer un chiffre si vous voulez le limiter (en MtC ou en %).

millions de tonnes de carbone

%

(sur les émissions de fin de période d'engagement : 0 % = le hot air est totalement éliminé)

Un message d'erreur s'affiche si l'un de ces chiffres est aberrant ou si les deux cases ont au contraire été remplies.

### Commentaire

Cette option sera maintenue dans la nouvelle version puisqu'elle peut aussi correspondre à une stratégie de la Fédération de Russie afin de « geler » une partie du *hot air* afin de bénéficier d'un prix d'échange plus élevé lors de la première et de la deuxième période d'engagement.

### Plafond à l'achat $\Leftrightarrow$ Supplémentarité

#### Logique / Hypothèse

Le plafond à l'achat (non différencié selon les régions) correspond à la traduction quantitative possible de la suppléantarité, sous la forme de la fixation d'un seuil minimum d'efforts nationaux : le pays acheteur ne peut pas acheter par le biais des mécanismes de flexibilité plus de x % des réductions qu'il doit effectuer.

#### Résolution

Pour les pays acheteurs :

$$Q_F^{r*} = \text{Minimum} (Q_{\max}^r - Q_D^{r*} ; x\% \cdot (a, b \text{ ou } c)) \text{ et}$$

$$Q_D^{r*} = \text{Max} \left( \frac{-a^r + \sqrt{(a^r)^2 + 4 \cdot b^r P^*}}{2 \cdot b^r} ; Q_{\max}^r - Q_F^{r*} \right)$$

Avec comme possibilités correspondant à une traduction formalisée des propositions européennes de quantification de la suppléantarité :

$$a = (E_{0r} + E_{Kr})/2 \text{ ou } b = (E_{1r} - E_{Kr}) \text{ ou } c = (5 \cdot E_{1r}) - E_{Kr}$$

#### Commentaire

Cette option n'a pas été retenue à Bonn et de fait, les versions de SAGESSE élaborées après cette date ne prennent plus en compte cette variante.

### Prise en compte des puits de carbone (propositions Pronk I, III, Bonn et Marrakech)

#### Logique / Hypothèse

Les objectifs de réduction (objectif de Kyoto ou autre) sont modifiés pour chaque pays ou région en intégrant le pourcentage de réduction des émissions qui peut être comptabilisé au titre de la séquestration du carbone par les puits. Une nouvelle évaluation des puits de carbone comportant de nouvelles spécifications a été discutée et adoptée à Marrakech lors de la 7<sup>ième</sup> Conférence des Parties en novembre 2001. Une option permet de simuler le marché d'échanges en intégrant ou non les puits de carbone. Par défaut, la prise en compte des puits de carbone est intégrée dans les calculs sous le format adopté à Marrakech. Le calcul particulier du montant et du pourcentage correspondant se trouve dans une feuille distincte et protégée, le calcul étant effectué pour chacun des pays, agrégé ensuite pour les ensembles de régions utilisées par SAGESSE. Les montants des puits de carbone tels que fixés lors de CoP 7 (Marrakech, novembre 2001) sont fournis en annexe.

Les chiffres fournis sont des évaluations et / ou des plafonds, susceptibles d'évoluer par la suite ; il est donc possible de les modifier dans SAGESSE en utilisant les options adéquates.

### Résolution

Le processus de résolution modifie la quantité de réduction d'émissions de gaz à effet de serre à entreprendre. Soit  $p^r$  le pourcentage pour chacun des puits correspondant aux puits de carbone :  $E_K^r$  devient  $(k^r / 100 - p^r / 100) \cdot E_0^r$  et  $Q_{\max}^r = (E_1^r - E_K^r)$  avec la nouvelle valeur de  $E_K^r$ .

### Présentation dans SAGESSE

Ne pas prendre en compte les puits de carbone, cochez cette case avec une lettre ou un chiffre : ?  
 Si vous voulez modifier les modalités adoptées lors de CoP 7, cliquez sur la barre grise :

Si l'option de modification des modalités est choisie, alors s'affiche :

Modification des modalités		Récapitulatif Ne rien inscrire		Récapitulatif Ne rien inscrire		Récapitulatif Ne rien inscrire	
		Article 3.3 (déboisements et reboisements)	Article 3.3 (déboisements et reboisements)	Article 3.4 Gestion forestière (au delà de la compensation)	Article 3.4 Gestion forestière (au delà de la compensation)	Article 3.4 Activités agricoles	Article 3.4 Activités agricoles
Pays	MtC par an	MtC par an	MtC par an	MtC par an	MtC par an	MtC par an	MtC par an

Cette option a été retenue à Marrakech et est donc maintenue dans la nouvelle version de SAGESSE. Si les valeurs sont modifiées pour une ou plusieurs régions, celles-ci seront prises en compte obligatoirement dans le calcul pour le pays considéré. Pour les autres, sera pris en compte les valeurs correspondant à celles de CoP 7. Il est aussi possible de ne pas prendre en compte les puits de carbone.

Dans le tableau des résultats reprenant les hypothèses des variantes utilisées sera précisé si sont pris en compte ou non les puits de carbone et si oui selon quelles modalités (CoP 7 ou autre).

### Réserve de période d'engagement (CPR)

#### Logique / Hypothèse

La Réserve de période d'engagement ou CPR est une disposition visant à limiter la survente qui se traduit par un plafond à la vente : les pays sont obligés de « geler » un pourcentage fixe de leurs permis.

La Réserve de période d'engagement concerne les ventes de permis qu'elles soient effectuées par des pays qui, à la fin de la période d'engagement, verront leur solde d'achat de permis positif ou non. Néanmoins, la maquette n'est pas un modèle dynamique et ne peuvent être pris en compte que les échanges globaux et non au cours de la période. Pour ce fait, seul le taux concernant les vendeurs nets de permis est utilisé puisque, dans la maquette, les pays dits acheteurs nets achètent mais ne vendent pas (leurs ventes, s'il y en a, sont comprises dans le solde).

#### Résolution

Pour pouvoir modéliser cette option, il faut tout d'abord déterminer les pays ou régions qui sont vendeurs nets sur le marché de permis. Pour cette raison, deux

étapes de calculs sont proposées pour résoudre ce problème. Etant donné qu'une première simulation a déjà eu lieu intégrant toutes les autres conditions que l'on veut voir tester, il suffit alors d'intégrer un plafond pour les ventes.

Soit  $c$  le pourcentage correspondant au taux de la Réserve de période d'engagement pour les pays vendeurs nets. Si :

$Q_F^{r*} < 0$  alors  $Q_F^{r*}(2) = \text{Minimum} ( c\%(E_1^r - E_K^r) )$ ;  $Q_F^{r*}$  (recalculé en intégrant les autres conditions)

Si  $Q_F^{r*} < 0$  et  $Q_F^{r*}(2) = ( c\%(E_1^r - E_K^r) )$  alors  $Q_D^{r*} = Q_{\max}^r - Q_F^{r*}$ .

*Présentation dans SAGESSE*

Pourcentage pour les pays vendeurs  %  
 Par défaut, ce pourcentage est de 100%.

### «Share of proceeds »

#### *Logique / Hypothèse*

Si un pays de l'Annexe B finance des projets de mécanisme de développement propre (MDP), sur les crédits dégagés de réduction d'émissions de gaz à effet de serre, il ne reçoit que  $(1-s)$  % de ces crédits,  $s$  étant précisément le taux de la *share of proceeds*. Cette variante peut aussi être étendue aux autres mécanismes (marché de permis et mise en œuvre conjointe).

#### *Résolution*

La somme des quantités de réduction d'émission doit être négative, le surplus étant stocké, mais on ne sait pas évaluer directement ce surplus (il est endogène).

Les pays de l'Annexe B doivent toujours respecter leur engagement.

La création d'une variable supplémentaire pour les réductions d'émissions par le biais du marché est nécessaire pour distinguer les réductions réellement effectuées dans les pays en développement des crédits obtenus lors de ces opérations. On a ainsi pour chaque pays  $r$  :

- ◇  $Q_D^{r*}$  : réductions effectuées en interne
- ◇  $Q_F^{r*}$  : ne désigne plus réductions financées par le marché ou réellement effectuées mais les seules réductions créditées par le marché (marché de permis, MOC, MDP)
- ◇  $Q_{F^r}^r$  : réductions financées par le marché ou réellement effectuées
- ◇  $Q_{\max}^r = Q_F^{r*} + Q_D^{r*}$  : équilibre comptable des permis reconnus vis à vis du Protocole.
- ◇ Cas n°1 : vendeur (hors Annexe B) de MDP :  $Q_{F^r}^r = Q_F^{r*} = Q_D^{r*}$
- ◇ Cas n°2 : vendeur Annexe B :  $Q_{\max}^r = Q_F^{r*} + Q_D^{r*} = Q_{F^r}^r + Q_D^{r*} \Rightarrow Q_{F^r}^r = Q_F^{r*}$
- ◇ Cas n°3 : acheteur Annexe B :  $Q_{\max}^r = Q_F^{r*} + Q_D^{r*}$ 
  - ◇ avec  $Q_{F^r}^r =$  quantités achetées aux vendeurs Annexe B + quantités réellement achetées aux vendeurs MDP
  - ◇ avec  $Q_F^{r*} =$  quantités achetées aux vendeurs Annexe B + quantités créditées par le biais du MDP
  - ◇ Si  $s$  est la valeur du pourcentage correspondant à la *share of proceeds*, quantités créditées par le biais du MDP  $\cdot (100-s)/100 =$  quantités réellement utilisables par les acheteurs de crédits MDP

La somme totale des  $Q_F^r$  est connue (égale à 0) alors que la somme des  $Q_F^{r*}$  est négative, le surplus étant « stocké ». Néanmoins, pour résoudre l'équation, il faut connaître pour chacun des pays acheteurs de l'Annexe B la part des crédits achetés via le MDP. Or, cette donnée n'est pas disponible. Par contre, la somme globale des ventes via le MDP, donc la part de ces ventes dans la somme totale des crédits est calculable.

Cette option a donc nécessité de recourir à une hypothèse supplémentaire : la part des achats par le biais du marché de permis et de la mise en œuvre conjointe ou par le biais du mécanisme de développement propre est identique pour tous les pays acheteurs.

La résolution du problème est donc telle que la somme des  $Q_F^r$  soit égale à zéro et que *in fine* la somme des  $Q_F^{r*}$  soit négative (plus de ventes que d'achats réels).

*Présentation dans SAGESSE*

Entrer un chiffre si vous voulez instaurer une *share of proceeds* en volume  
 %

Voulez vous l'étendre (**extension** de la *share of proceeds*) aux autres mécanismes (marché et mise en œuvre conjointe) ?  
 Taper "1" :

Cette option a été retenue à Bonn et le chiffre de 2 % adopté. Cette option à ce taux fixe (par défaut) est donc adopté dans SAGESSE. Si, dans une simulation, un taux supérieur à cette valeur de 2 % est retenu, il peut être interprété comme un coût administratif lié à l'élaboration / certification / validation d'un projet relevant du MDP.

Taxe sur le marché de permis et la mise en œuvre conjointe

*Logique / Hypothèse*

Une taxe sur le marché de permis et la mise en œuvre conjointe peut être simulée et étendue au même niveau ou au même taux au mécanisme de développement propre. Pour les pays dits « acheteurs nets », le prix d'équilibre est celui intégrant la taxe. Leur coût est aussi fonction de la taxe, au contraire des vendeurs.

*Résolution*

Les équations restent inchangées pour les pays vendeurs. Pour les pays acheteurs, l'arbitrage entre réductions effectuées en interne et réductions par le biais du marché se trouve modifié :

$$Q_D^{r*} = \frac{-a^r + \sqrt{(a^r)^2 + 4 \cdot b^r P^*}}{2 \cdot b^r}$$

devient :

$$Q_D^{r*} = \frac{-a^r + \sqrt{(a^r)^2 + 4 \cdot b^r (P_t^* + t)}}{2 \cdot b^r}$$

Avec :  $P_t^* = P^*(1+t)/100$  si la taxe est exprimée en pourcentage et  $P_t^* = P^* + t$  si la taxe est exprimée en montant.

De même, le coût (d'abattement) lié aux échanges de permis est de :

$$C_F^{r*} = P^* \cdot Q_F^{r*} \text{ devient } C_F^{r*} = y \cdot (P_t^* \cdot Q_F^{r*}) + (1-y) \cdot (P^* \cdot Q_F^{r*})$$

avec  $y$  représentant la part des ventes d'émissions par le marché de permis et la mise en œuvre conjointe dans les ventes totales (c'est à dire englobant le mécanisme de développement propre). Néanmoins, pour résoudre l'équation, il faut connaître pour chacun des pays acheteurs de l'Annexe B la part des crédits achetés via le MDP. Or, cette donnée n'est pas disponible. Par contre, la somme globale des ventes via le MDP, donc la part de ces ventes dans la somme totale des crédits est calculable.

L'hypothèse posée est alors que la structure des achats de crédits d'émissions est identique pour tous. Autrement dit, les achats des pays de l'Annexe B présentent tous la même proportion de MDP.

Si la taxe est étendue au MDP, le coût lié aux échanges est alors :  $C_F^{r*} = P_t^* \cdot Q_F^{r*}$

*Présentation dans SAGESSE*

Entrer un chiffre si vous voulez taxer les échanges (et la MOC) en % ou en dollar

\$90 par tonne de carbone échangée

%

Si vous voulez taxer au même niveau ou même taux le MDP, taper "1" .

Cette option n'a pas été retenue lors des dernières négociations mais la nouvelle version de SAGESSE la prend en compte. Elle pourrait être utile dans l'hypothèse où l'on souhaite renforcer les différents financements prévus si les sommes recueillies ne sont pas assez importantes, ainsi que dans la perspective des prochaines périodes d'engagement.

## LA PRESENTATION DES RESULTATS

Les résultats se présentent sur une feuille de calcul comportant trois parties distinctes :

- Tout d'abord, un récapitulatif des options demandées : chaque option est rappelée dans un tableau, une première colonne affiche si l'option a été demandée. Si oui, une colonne supplémentaire rappelle la modalité demandée. Par exemple, pour la *share of proceeds*, le pourcentage est rappelé.

Par exemple :

Liste des options	Prise en compte	Condition demandée
- Limitation du hot air :	OUI	80 %
- Taxation des échanges	NON	
- Share of Proceeds	OUI	2 %
- Réserve de période d'engagement	OUI	100 %
- Prise en compte des puits de carbone	OUI	selon modalités CoP 6 bis

- Un deuxième tableau présente les principaux résultats comme le prix de permis (en 90\$ par tonne de carbone, en euros de 1999 par tonne de carbone et par tonne de CO<sub>2</sub>), le prix de permis avec taxe (s'il y en a une), les crédits dégagés par la *share of proceeds* si elle est sélectionnée (en millions de tonnes de carbone puis valorisés par le prix du marché de permis), le gain de la taxe (si elle est sélectionnée) puis les quantités échangées et la part des échanges (marché, MOC et MDP) dans les réductions. Par exemple :

### Principaux résultats :

- ◇ **Prix d'équilibre du marché de permis = 12,8 \$ 90 par tonne de carbone soit 14,7 E99 / tC ou 4,0 E99/tCO<sub>2</sub>**
- ◇ (*Prix d'équilibre du marché de permis avec taxe*)
- ◇ Crédits en volume dégagés par la share of proceeds = 6 millions de tonne de carbone
- ◇ Crédits en valeur dégagés par la share of proceeds = 83 millions de \$ 90 soit 94,2 M E99 / tC ou 25,7 M E99 / tCO<sub>2</sub>
- ◇ (*Recette de la taxe en millions de dollars 90 sur les échanges*)
- ◇ Quantités échangées = 616 millions de tonnes de carbone (y compris les crédits éventuels de la *share of proceeds*)
- ◇ Part des échanges dans les réductions : 84,4%

- Enfin, les résultats sont détaillés par pays et reprennent pour chacun d'entre eux :

- ◇ l'objectif de réduction
- ◇ l'objectif de réduction avec puits de carbone
- ◇ la quantité totale de réductions
- ◇ le coût domestique
- ◇ le coût total
- ◇ le coût des échanges
- ◇ la quantité de réduction avec échanges
- ◇ la part des échanges (en volume)
- ◇ le gain de l'utilisation du marché vis à vis des seules réductions domestiques
- ◇ le taux d'effort
- ◇ la quantité de permis désirée sans CPR
- ◇ la quantité de permis avec CPR (ces deux colonnes sont strictement identiques si la CPR n'est pas sélectionnée)
- ◇ le coût de la taxe (nul si pas de taxe)
- ◇ le revenu dégagé par la « share of proceeds » (nul si pas de « share of proceeds »)

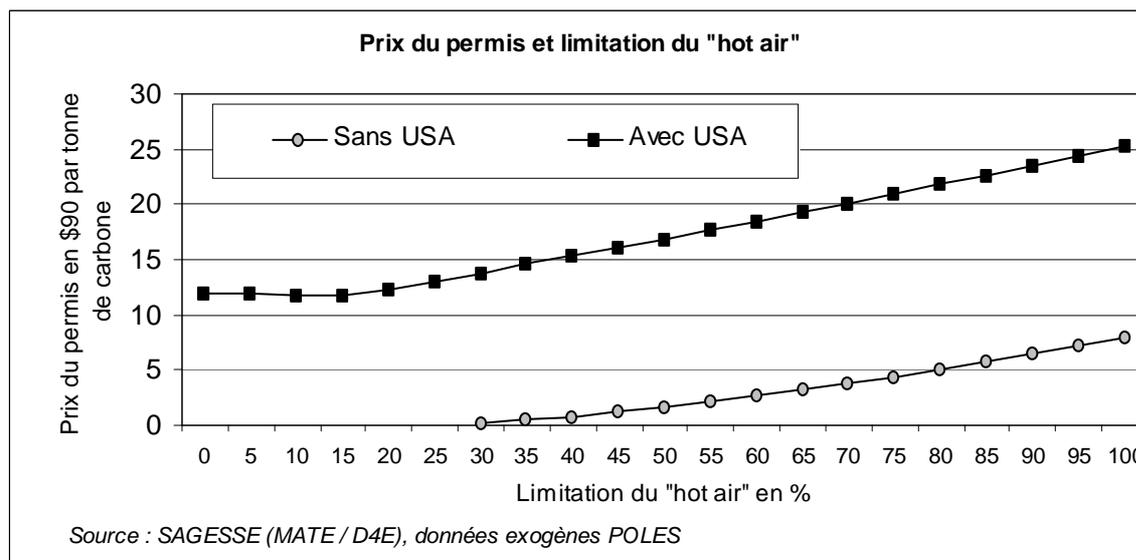
## EXEMPLES D'UTILISATION

### SIMULATION DE LA SITUATION DE REFERENCE DEPUIS LA CONCLUSION DE COP 7

Entre la conférence de Bonn en juillet 2001 (CoP 6 bis) et celle de Marrakech (CoP 7), seuls ont été modifiés les plafonds des puits pour la Fédération de Russie, tout au moins en ce qui concerne la simulation par le biais de la maquette d'un marché d'échanges de permis d'émissions de gaz à effet de serre. Cette simulation prend donc en compte les puits de carbone dont les niveaux ont été réévalués, une réserve de période d'engagement de 100 % et une *share of proceeds* de 2 %.

#### Effet du « hot air » et scénario de référence

Néanmoins, depuis mars 2001, il est probable que les Etats-Unis ne participent pas au marché d'échanges. De ce fait, SAGESSE, comme de nombreux autres modèles, ne peut trouver une solution car le prix d'équilibre n'est plus positif. L'offre de permis d'émissions de gaz à effet de serre excède en effet largement le volume potentiel d'achats correspondants. Cette offre est particulièrement importante en raison du volume du *hot air* russe disponible sur le marché.

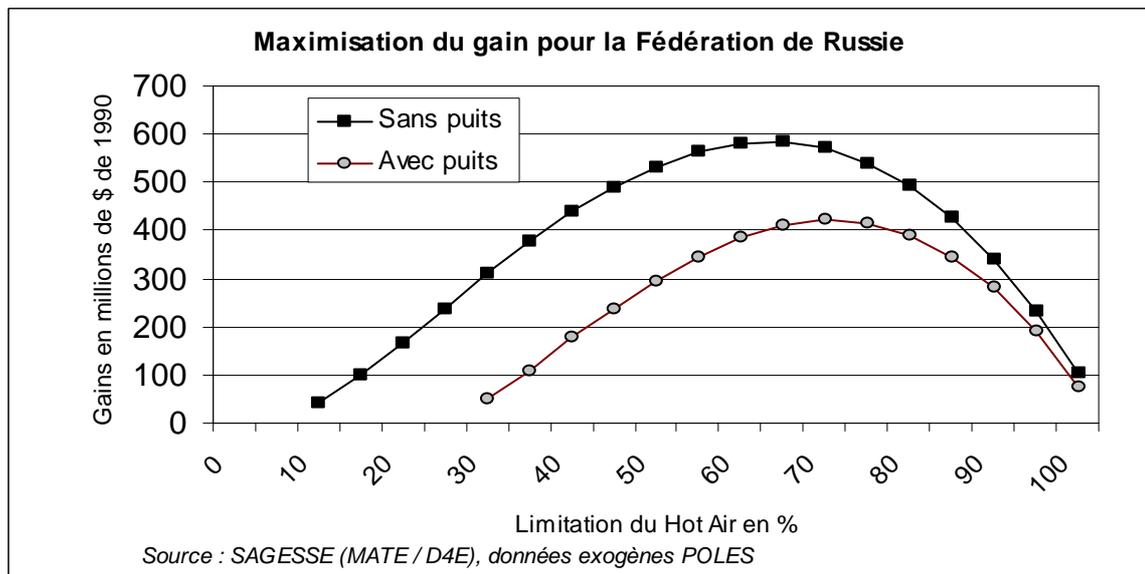


Pour simuler une situation de référence, il nous faut poser comme hypothèse une limitation d'une partie du *hot air* russe, hypothèse étayée par le comportement probable dans une telle situation de la Fédération de Russie. En effet, il serait logique pour ce pays d'adopter, en

raison de son pouvoir de monopole et de sa capacité à « redresser » le faible prix d'équilibre, une stratégie de mise en réserve (« banking »). Il s'agit du scénario le plus probable. Cette logique a plusieurs effets :

- en premier lieu, l'offre étant moins importante, le prix d'équilibre a tendance à augmenter mécaniquement ;
- le prix d'équilibre étant auparavant nul, toute augmentation du prix d'équilibre provoque automatiquement un gain pour la Fédération de Russie ;
- une partie du *hot air* n'est pas mise en vente et le sera sans doute lors des prochaines périodes d'engagement. Si l'on part du principe que les contraintes de réduction seront plus contraignantes lors de ces futures périodes, les gains futurs pour les russes seront donc ainsi majorés ultérieurement et leurs futures réductions moins contraignantes.

Afin de comparer différentes variantes, toutes choses égales par ailleurs, il est utile de se baser sur un seul scénario de référence donc un scénario probable utilisant une valeur unique de limitation du *hot air*. L'hypothèse utilisée est alors que le pourcentage de *hot air* russe mis sur le marché - ou la stratégie de « banking » - doit être celui qui maximise le gain de la Fédération de Russie.



Le maximum des gains pour la Fédération de Russie est atteint pour une limitation de 71% du *hot air* (ce qui implique que seulement 29% du *hot air* est utilisé lors de la première période d'engagement) ce qui correspond à un gain de 422,4 millions de dollars de 1990 pour la Fédération de Russie, si ce scénario est adopté, vis à vis d'une situation où le Protocole de Kyoto n'est pas appliqué. C'est donc cette hypothèse qui a été retenue pour le scénario de référence.

### Résultats du scénario de référence

Les hypothèses utilisées pour la simulation du scénario de référence depuis la conclusion de CoP 7 sont :

Liste des options	Prise en compte	Condition
- Limitation du hot air :	OUI	29%
- Taxation des échanges	NON	
- Share of Proceeds	OUI	2%
- Réserve de période d'engagement	OUI	100%
- Prise en compte des puits de carbone	OUI	selon modalités CoP 7

Le prix d'équilibre du marché de permis est 3,9 \$ de 1990 par tonne de carbone soit 4,5 euros de 1990 par tonne de carbone (1,5 euros de 1999 par tonne de CO<sub>2</sub>).

La *share of proceeds* génère un crédit de 3 millions de tonnes de carbone soit 12 millions de dollars de 1990. 271 millions de tonnes de carbone sont échangées, ce qui représente 95,2 % de l'ensemble des réductions effectuées par les pays de l'Annexe B hors États-Unis.

Scénario de référence post CoP 7 : Annexe B

		Engagements du Protocole avant recours au permis				Marché de permis						
Continents	Pays ou région	Objectif de réduction	Objectif de réduction avec puits de carbone	Quantité totale de réductions	Coût domestique	Coût total	dont coût des échanges	Quantité de réduction avec échanges	Part des échanges dans le total des réductions	Gain en coût	Taux d'effort = coût total / PIB	Coût du Share of Proceeds
		en % /90	en % /90	en MtC	en M\$90	en M\$90	en M\$90	en MtC	en %	en %	en %	en M\$90
Amérique	Canada	-6,00	4,16	18	725	70	68	17	94,1	938,8	0,01	1
Europe	Union Européenne	-8,40	-7,7	161	13682	623	607	153	95,1	2096,8	0,01	7
	<i>France</i>	<i>0,00</i>	<i>0,60</i>	<i>16</i>	<i>1221</i>	<i>61</i>	<i>60</i>	<i>15</i>	<i>96,5</i>	<i>1884,9</i>	<i>0,00</i>	<i>1</i>
	<i>Allemagne</i>	<i>-21,00</i>	<i>-20,64</i>	<i>25</i>	<i>536</i>	<i>92</i>	<i>87</i>	<i>22</i>	<i>89,3</i>	<i>483,7</i>	<i>0,00</i>	<i>1</i>
	<i>Italie</i>	<i>-6,50</i>	<i>-6,01</i>	<i>19</i>	<i>2303</i>	<i>76</i>	<i>75</i>	<i>19</i>	<i>97,8</i>	<i>2922,0</i>	<i>0,01</i>	<i>1</i>
	<i>Grande Bretagne</i>	<i>-12,50</i>	<i>-11,92</i>	<i>26</i>	<i>1166</i>	<i>101</i>	<i>98</i>	<i>25</i>	<i>93,7</i>	<i>1053,5</i>	<i>0,01</i>	<i>1</i>
	<i>Reste de l'UE du Nord</i>	<i>-6,10</i>	<i>-4,82</i>	<i>58</i>	<i>7848</i>	<i>226</i>	<i>223</i>	<i>56</i>	<i>97,5</i>	<i>3375,2</i>	<i>0,02</i>	<i>3</i>
	<i>Reste de l'UE du Sud</i>	<i>18,80</i>	<i>19,56</i>	<i>17</i>	<i>610</i>	<i>67</i>	<i>64</i>	<i>16</i>	<i>93,0</i>	<i>816,9</i>	<i>0,01</i>	<i>1</i>
	Reste de l'Europe de l'Ouest	-4,10	-0,62	6	458	22	21	5	97,1	2025,2	0,01	0
	Pol, Hon, Tchéc, Slov	6,80	7,63	15	188	54	49	13	83,3	246,0	0,01	1
Reste de l'Europe centrale	-3,30	-2,33	1	3	3	1	0	32,7	12,0	0,00	0	
Fédération de Russie	0,00	3,97			-422	-440	-112			-0,03		
Asie	Japon	-6,00	-2,11	54	3477	210	206	52	95,7	1554,4	0,01	2
Océanie	Australie+Nouvelle Zélande	6,80	13,54	29	1095	111	107	27	92,9	889,7	0,02	1
<b>Total Annexe B</b>		<b>-3,43</b>	<b>-0,6</b>	<b>279</b>	<b>19170</b>	<b>648</b>	<b>598</b>	<b>150</b>	<b>53,7</b>			<b>12</b>
Pour mémoire, USA		-7,00	-4,68	445	25060							

Source : SAGESSE (MATE / D4E), données exogènes POLES

Scénario de référence post CoP 7 : reste du monde

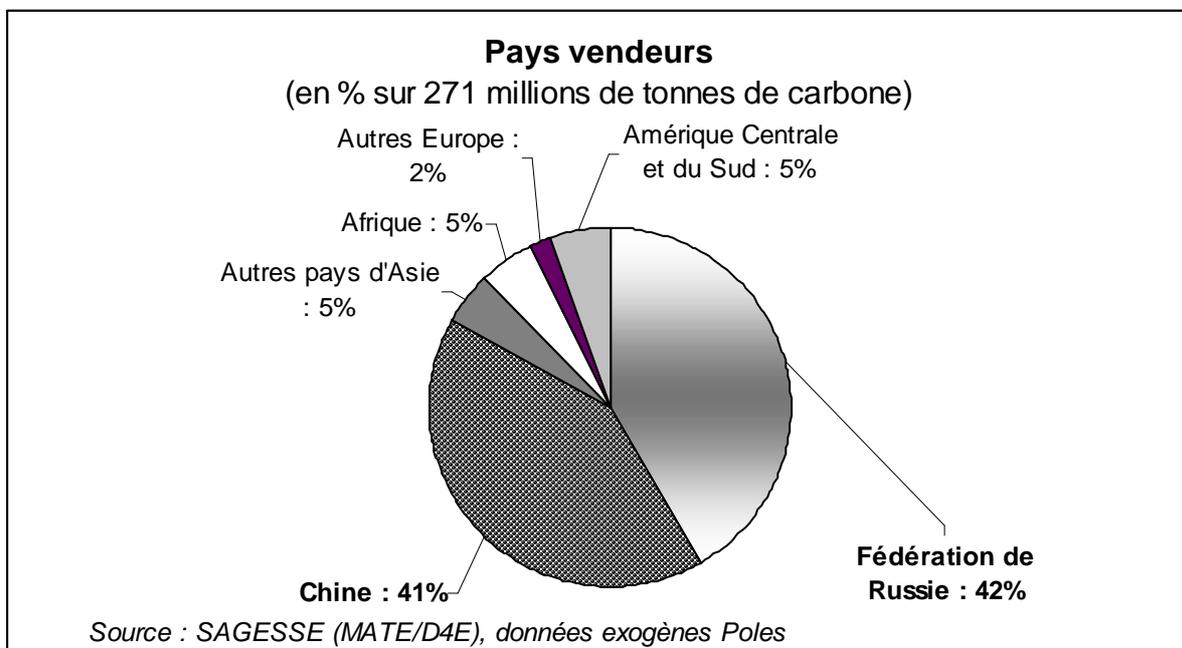
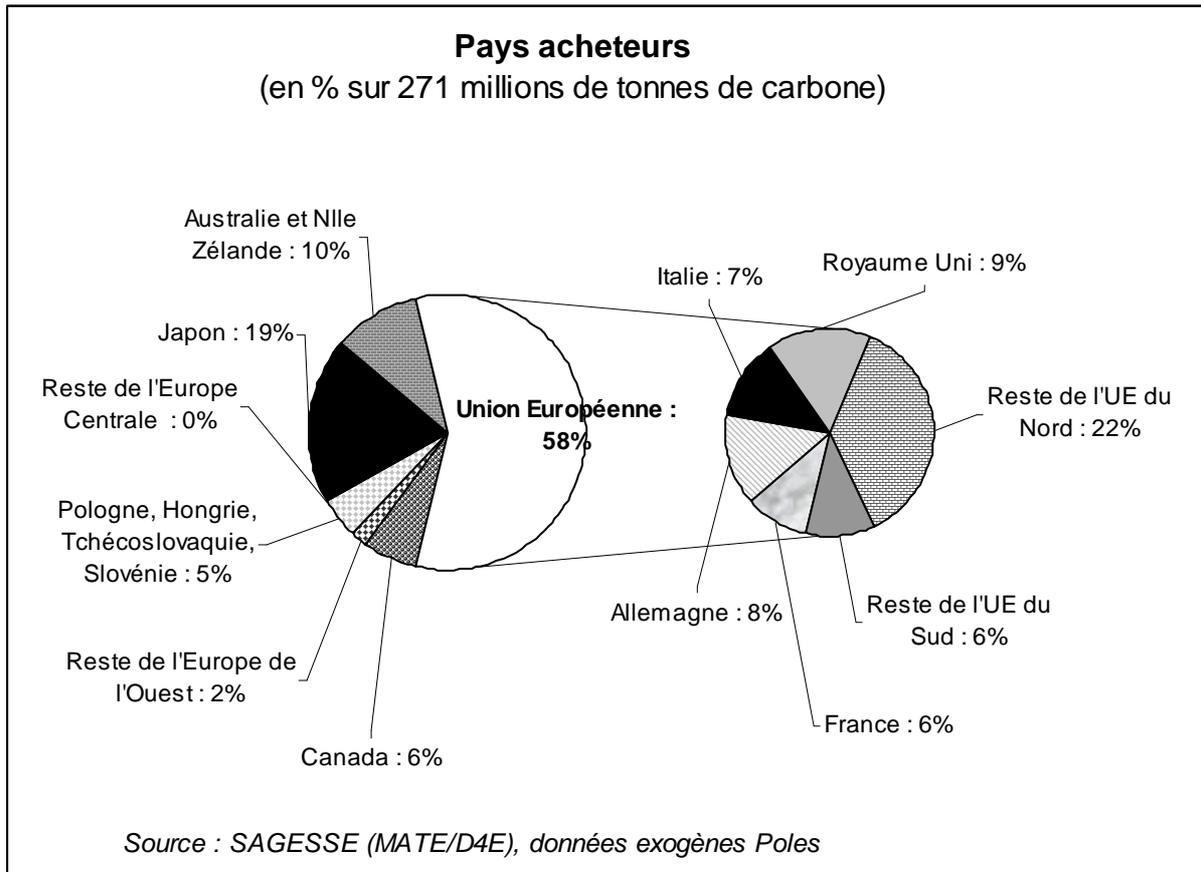
Continents	Pays ou région hôtes pour le MDP	Gain en M\$90	Quantité de réduction en MteC
Amérique	Mexique	5	1
	Reste de l'Amérique centrale	1	0
	Brésil	6	1
	Reste de l'Amérique du Sud	46	12
Europe	Turquie	10	2
	Reste de l'Europe centrale (Non Annexe B)	1	0
	Fédération de Russie (Non Annexe B)	8	2
Afrique	Egypte	1	0
	Pays d'Afrique du Nord (non exportateurs de pétrole)	0	0
	Pays d'Afrique du Nord (exportateurs de pétrole)	2	1
	Pays du Golfe	10	3
	Moyen-Orient	2	1
	Afrique Sud du Sahara	38	10
Asie	Inde	20	5
	Reste de l'Asie du sud	2	1
	Corée	4	1
	Reste de l'Asie du Sud-Est	24	6
	Chine	439	112
Total		619	158

Source : SAGESSE (MATE / D4E), données exogènes POLES

Sur les 271 millions de tonnes de carbone échangées sur le marché de permis, 158 millions proviennent du mécanisme de développement propre soit plus de 58 %. En l'absence des Etats-Unis, l'Union Européenne est potentiellement le plus gros acheteur, suivie du Japon. La Fédération de Russie et la Chine sont eux les plus gros bénéficiaires avec plus de 80 % des ventes de permis.

Néanmoins, la maquette utilise des données relatives uniquement au dioxyde de carbone. Dans l'hypothèse de prise en compte des autres gaz à effet de serre, les résultats devraient être sensiblement différents, surtout en ce qui concerne les potentialités réelles du mécanisme de développement propre.

Scénario de référence post CoP 7  
Les échanges internationaux de permis



## UNE ETUDE RETROSPECTIVE : EFFORT ECONOMIQUE REQUIS PAR LES PARTIES DANS LE CAS OU LES USA PARTICIPENT

La maquette SAGESSE a été utilisée au printemps 2001 pour une étude sur les taux d'effort<sup>9</sup> requis par l'application du Protocole de Kyoto. Le marché d'échange de permis d'émissions négociables modélisé ici l'est sans aucune limitation, plafond ou taxation. Afin de faciliter les comparaisons entre les différents pays de l'Annexe B, le mécanisme de développement propre (MDP) n'est pas pris en compte alors qu'il conduirait à abaisser les coûts.

Le but de cette étude était d'étudier les impacts sur le gain environnemental et les objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre d'une modification des efforts requis tout d'abord en les plafonnant puis en les homogénéisant. Les résultats obtenus devaient alors mettre en évidence des écarts entre ces scénarios en terme de gain environnemental<sup>10</sup>, objectif de réduction requis ou échanges de permis mais aussi les différences entre les groupes de pays de l'Annexe B.

### Hétérogénéité des efforts requis par l'application du Protocole de Kyoto

Le coût de l'application du Protocole de Kyoto est, pour chaque pays, le coût de l'effort de réduction effectué sur son sol, corrigé éventuellement des achats ou des ventes de permis. Pour obtenir ces coûts, la maquette SAGESSE est mobilisée. Puis pour normer les résultats, ils sont rapportés au PIB du pays considéré.

A priori si les objectifs de réduction peuvent paraître relativement semblables pour certains pays (-7 % par rapport à 1990 pour les Etats-Unis et -8 % pour l'Union Européenne), leur traduction économique met en avant de grandes différences.

Dans le cadre du Protocole de Kyoto, l'introduction d'un marché de permis d'émissions négociables permet de desserrer la contrainte géographique, et autorise un pays à se prévaloir de réductions d'émissions effectuées en dehors de son sol. **Ce cas sera utilisé comme point de comparaison tout au long de l'étude. Il s'agit de la situation dite de référence (pour le §5.2).**

Les disparités économiques entre les pays de l'Annexe B varient de 0,02 % pour l'ensemble de la Pologne, de la Hongrie, de la République Tchèque et de la Slovénie à 0,2 % pour les Etats-Unis. Ainsi pour l'ensemble de l'Annexe B, le taux d'effort s'établit à 0,04 point du PIB de 2010 (il inclut la Fédération de Russie) et à 0,07 point pour l'ensemble de l'Union Européenne.

En ce qui concerne les échanges de permis, ceux-ci portent sur 422 millions de tonnes de carbone. La Fédération de Russie est le principal vendeur net (97 % du marché) et se trouve en situation de quasi-monopole. Le prix d'équilibre du marché est de 51 dollars de 1990 par tonne de carbone. Les Etats-Unis (60 %) et l'Union Européenne (21 %) sont les principaux acheteurs sur le marché.

---

<sup>9</sup> Le taux d'effort est le coût des réductions d'émissions de gaz à effet de serre rapporté au produit intérieur brut de 2010.

<sup>10</sup> Le gain environnemental est le pourcentage de réduction des émissions de gaz à effet de serre de l'ensemble des pays de l'Annexe B. Dans le cadre du Protocole de Kyoto, l'ensemble des pays de l'Annexe B s'est engagé à réduire ses émissions de gaz à effet de serre de 5,2 % par rapport à leur niveau de 1990 (moyenne des objectifs de réduction de chacun de ces pays pondérée en fonction de leurs montants d'émission).

## Application des objectifs de Kyoto

Pays ou région	Réductions en interne		Kyoto et marché de permis		Avec puits de carbone (plafonds autorisés lors de CoP 6 bis)	
	Objectif de Kyoto (1)	Taux d'effort (2)	Objectif de Kyoto	Taux d'effort	Objectif de réduction	Taux d'effort
Etats Unis	-7,0	0,33	-7,0	0,20	-3,7	0,14
Canada	-6,0	0,27	-6,0	0,15	+5,1	0,05
Union Européenne <i>dont France (répartition bulle européenne)</i>	-8,4 <i>0,0</i>	0,17 <i>0,09</i>	-8,4 <i>0,0</i>	0,07 <i>0,05</i>	-6,8 <i>+1,6</i>	0,05 <i>0,03</i>
Reste de l'Europe de l'Ouest	-4,1	0,16	-4,1	0,07	+0,1	0,04
Pol, Hon, Tchéc, Slov	6,8	0,04	6,8	0,02	+8,6	0,02
Reste de l'Europe centrale (Annexe B)	-3,3	0,00	-3,3	-0,05	-1,4	-0,04
Fédération de Russie (Annexe B)	0,0	0,00	0,0	-1,31	3,1	-0,9
Japon	-6,0	0,17	-6,0	0,08	-1,1	0,05
Australie+Nouvelle Zélande	6,8	0,26	6,8	0,19	14,5	0,11
<b>Ombrelle<sup>(3)</sup></b>	<b>-6,2</b>	<b>0,29</b>	<b>-6,2</b>	<b>0,17</b>	<b>-2,0</b>	<b>0,11</b>
<b>Annexe B</b>	<b>-4,7</b>	<b>0,22</b>	<b>-4,7</b>	<b>0,04</b>	<b>-1,4</b>	<b>0,02</b>
Prix du permis en \$90 par tonne de carbone			50,9		34,8	

(1) en émissions 2010 / émissions 1990

(2) en coût de réduction des émissions / PIB

(3) en raison des regroupements des différents pays au sein de POLES, les pays ici comptabilisés sont les Etats-Unis, le Canada, le Japon, l'Australie et la Nouvelle Zélande.

Source : Maquette SAGESSE (D4E), données exogènes Pôles

La prise en compte des puits de carbone<sup>11</sup> permet de desserrer la contrainte pesant sur les pays de l'Annexe B par le biais des objectifs de réduction. Les modifications introduites par les puits sont plus importantes pour les pays de l'Ombrelle que les autres et leur introduction devrait donc aller dans le sens d'une réduction des disparités de taux d'efforts. Cette prise en compte des puits de carbone a donc mécaniquement pour effet une baisse du taux d'effort pour certains pays. Néanmoins, si l'amplitude des taux d'effort observés est moins importante que dans le cadre de référence (cas précédent), les écarts de taux d'effort entre pays restent relativement élevés. De plus, pour le total de l'Annexe B, le gain environnemental passe alors d'une réduction globale de 4,7 % à une réduction de 3,8 %. Rappelons cependant que sans Protocole, la perte environnementale aurait été de 7,8 %<sup>12</sup>.

Ainsi, même en prenant en compte les mécanismes de flexibilité et les puits de carbone, le taux d'effort moyen d'une partie des pays constituant l'Ombrelle (Etats-Unis, Canada, Japon, Australie et Nouvelle Zélande) est de 0,11 point alors que celui de l'Union Européenne s'élève à 0,05.

### Modification des objectifs en fonction des taux d'effort

Les taux d'effort calculés précédemment résultent directement des objectifs de réduction fixés par le Protocole de Kyoto. Si l'on inverse le raisonnement, et que l'on fixe directement les taux d'effort de certains pays, les objectifs de réduction individuels vont s'en ressentir ainsi

<sup>11</sup> Les règles de prise en compte des puits de carbone ainsi que les données chiffrées utilisées dans cette étude sont identiques à celles issues de la dernière conférence des parties ayant eu lieu en juillet 2001 à Bonn (COP6 bis).

<sup>12</sup> Les émissions de l'Annexe B évoluent de +7,8 % entre 2010 et 1990 dans le cadre du scénario « business as usual » de POLES.

que le gain environnemental (ensemble des réductions des pays de l'Annexe B). Deux cadres d'analyse ont été traités :

- ◇ dans un premier temps, une logique purement économique a prévalu, et les taux d'effort ont été plafonnés tout d'abord au niveau de celui de l'Union Européenne dans son ensemble (pour les pays pour lesquels celui-ci était plus élevé), puis au niveau de celui de l'ensemble des pays de l'Annexe B,
- ◇ dans un deuxième temps, une logique environnementale a prévalu, et tous les taux d'effort ont été homogénéisés tout en respectant la contrainte environnementale globale fixée par le Protocole de Kyoto. Autrement dit, l'étude a envisagé la possibilité de renégocier les engagements de Kyoto au sein d'une bulle à la dimension de l'Annexe B.

*Plafonnement des taux d'effort : allègement de la contrainte et perte en terme de gain environnemental*

### Plafonnement des taux d'effort

Pays ou région	Kyoto et marché de permis		Plafonnement sur taux d'effort de l'UE soit 0,07		Taux de l'Annexe B (réf) pour tous sauf Russie soit 0,04	
	Objectif de Kyoto	Taux d'effort	Objectif de réduction	Taux d'effort	Objectif de réduction	Taux d'effort
Etats Unis	-7,0%	0,20%	7,4%	0,07%	11,2%	0,04%
Canada	-6,0%	0,15%	0,3%	0,07%	3,5%	0,04%
Union Européenne	-8,4%	0,07%	-15,2%	0,07%	-11,2%	0,04%
<i>France (répartition bulle européenne)</i>	0,0%	0,05%	-6,7%	0,05%	-3,0%	0,03%
<i>France (sans répartition bulle européenne)</i>					-14,0%	0,04%
Reste de l'Europe de l'Ouest	-4,1%	0,07%	-4,1%	0,05%	-10,7%	0,04%
Pol, Hon, Tchéc, Slov	6,8%	0,02%	6,8%	0,04%	5,4%	0,04%
Reste de l'Europe centrale (Annexe B)	-3,3%	-0,05%	-3,3%	-0,01%	-9,2%	0,04%
Fédération de Russie (Annexe B)	0,0%	-1,31%	0,0%	-0,78%	0,0%	-0,41%
Japon	-6,0%	0,08%	-6,0%	0,06%	-7,4%	0,04%
Australie+Nouvelle Zélande	6,8%	0,19%	22,1%	0,07%	26,9%	0,04%
<b>Ombrelle <sup>(1)</sup></b>	<b>-6,2%</b>	<b>0,17%</b>	<b>+5,4%</b>	<b>0,07%</b>	<b>+8,4%</b>	<b>0,04%</b>
<b>Annexe B</b>	<b>-4,7%</b>	<b>0,04%</b>	<b>-0,7%</b>	<b>0,02%</b>	<b>1,4%</b>	<b>0,01%</b>
Prix du permis	50,9	50,9	31,6	31,6	22,3	22,3

(1) en raison des regroupements des différents pays au sein de Pôles, les pays ici comptabilisés sont les Etats-Unis, le Canada, le Japon, l'Australie et la Nouvelle Zélande.

Source : Maquette SAGESSE (D4E), données exogènes Pôles

Une première possibilité, et qui peut être envisagée favorablement en termes d'équité, consiste à abaisser le taux d'effort des pays de l'Ombrelle au même niveau que celui de l'Union Européenne, soit 0,07 %. Ce plafonnement du taux d'effort concerne les Etats-Unis, le Canada, l'Australie et la Nouvelle Zélande. Le gain environnemental est alors cependant inférieur à celui décidé lors du Protocole de Kyoto. Si le taux d'effort reste identique pour l'Union Européenne, la réduction des émissions vis à vis de celles de 1990 passe de -8,4 % dans le cadre de référence à -15,2 %. Ainsi, pour le même taux d'effort, la quantité de réduction possible se trouve augmentée.

Néanmoins, ce plafonnement du taux d'effort a des conséquences non négligeables quant à l'intégrité environnementale pour l'ensemble de l'Annexe B. Si, pour le cadre de référence, c'est à dire l'application des objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre définis dans le Protocole de Kyoto, la réduction globale pour les pays de l'Annexe B était de

5 % environ, elle est dans ce cas particulier de 0,7 % seulement. **Le plafonnement des taux d'effort au niveau de celui de l'Union Européenne a donc un effet important sur l'intégrité environnementale.**

Dans une deuxième simulation, les taux d'effort sont plafonnés au niveau de celui obtenu pour l'ensemble des pays de l'Annexe B dans le cadre de référence soit 0,04 %. L'impact négatif en terme d'intégrité environnementale est encore plus important que dans le cas précédent, puisque l'on a réduit le plafond des taux d'effort. En effet, on passe d'une réduction des émissions vis à vis de 1990 de 5 % à une augmentation de 1,4 %. En revanche, la situation de très nombreux pays s'améliore.

Le Japon est le seul pays de l'Ombrelle dont l'objectif le moins contraignant, économiquement, est celui fixé lors du Protocole de Kyoto.

Pour l'Union Européenne, cette forme d'équité en termes de taux d'effort modifie l'objectif de Kyoto de -8 % à -12,2 % et risque de poser un problème en terme de renégociation à l'intérieur de la bulle européenne. En effet, si elle avantage les pays de l'Union Européenne du nord, elle accentue la contrainte des autres pays de l'Union Européenne. Ceci est particulièrement sensible pour l'Allemagne ou les pays d'Europe du sud.

#### *Homogénéisation des taux d'effort avec respect de l'intégrité environnementale*

#### **Uniformisation des taux d'effort**

Pays ou région	Kyoto et marché de permis		Taux de l'Annexe B pour tous soit 0,04		Taux identique pour tous sauf Russie	
	Objectif de Kyoto	Taux d'effort	Objectif de réduction	Taux d'effort	Objectif de réduction	Taux d'effort
Etats Unis	-7,0%	0,20%	13,9%	0,04%	3,0%	0,13%
Canada	-6,0%	0,15%	8,5%	0,04%	-3,0%	0,13%
Union Européenne	-8,4%	0,07%	-2,9%	0,04%	-18,8%	0,13%
<i>France (répartition bulle européenne)</i>	0,0%	0,05%	6,0%	0,02%	-11,4%	0,09%
<i>France (sans répartition bulle européenne)</i>			0,3%	0,04%	-23,3%	0,13%
Reste de l'Europe de l'Ouest	-4,1%	0,07%	5,4%	0,04%	-21,9%	0,13%
Pol, Hon, Tchéc, Slov	6,8%	0,02%	5,1%	0,04%	-0,5%	0,13%
Reste de l'Europe centrale (Annexe B)	-3,3%	-0,05%	-8,7%	0,04%	-13,5%	0,13%
Fédération de Russie (Annexe B)	0,0%	-1,31%	-46,7%	0,04%	0,0%	-1,31%
Japon	-6,0%	0,08%	2,4%	0,04%	-15,5%	0,13%
Australie+Nouvelle Zélande	6,8%	0,19%	28,9%	0,04%	16,3%	0,13%
<b>Ombrelle <sup>(1)</sup></b>	<b>-6,2%</b>	<b>0,17%</b>	<b>+12,3%</b>	<b>0,04%</b>	<b>+0,2%</b>	<b>0,13%</b>
<b>Annexe B</b>	<b>-4,7%</b>	<b>0,04%</b>	<b>-4,7%</b>	<b>0,04%</b>	<b>-4,7%</b>	<b>0,04%</b>
Prix du permis	50,9	50,9	50,9	50,9	50,9	50,9

(1) en raison des regroupements des différents pays au sein de Pôles, les pays ici comptabilisés sont les Etats-Unis, le Canada, le Japon, l'Australie et la Nouvelle Zélande.

Source : Maquette SAGESSE (D4E), données exogènes Pôles

La situation de la Fédération de Russie étant exceptionnelle, la question s'est posée de savoir ce que deviendraient les objectifs si l'on décidait de respecter le gain environnemental pour l'ensemble des pays de l'Annexe B tel que décrit dans le cadre de référence soit une réduction globale de 4,7 % tout en fixant des taux d'effort identiques, dans un premier temps pour tous les pays, puis **pour tous les pays sauf la Russie qui garde alors un objectif identique de stabilisation par rapport à l'année de référence.**

Si le taux d'effort global de l'Annexe B est appliqué à tous les pays soit 0,04 %, les objectifs de réduction sont tous modifiés de manière sensible, la répartition des efforts étant la plus équitable économiquement. En fait seules trois régions observent une dégradation de leur situation : l'ensemble de la Pologne de la Hongrie, de la Tchécoslovaquie et de la Slovénie le reste de l'Europe centrale et enfin la Fédération de Russie dont les taux d'effort étaient respectivement dans le cas de référence de 0,02 %, -0,05 % et -1,31 %. De plus, le volume des échanges est bien plus bas (59 millions de tonnes de carbone contre 422 dans le cas de référence).

Pour le cas particulier de la Fédération de Russie, son objectif est dorénavant de -46,7 % puisque le *hot air* est éliminé par ce biais. Ce pourcentage de réduction peut sembler important mais la Fédération de Russie enregistrait en 1996 (dernières données communiquées à l'UNFCCC) une réduction de 36 % environ de ses émissions de gaz à effet de serre par rapport à 1990, ce qui relativise l'effort réel à réaliser.

Néanmoins, ce cas n'est guère satisfaisant en termes de négociation puisque l'objectif fixé pour la Fédération de Russie est très fortement modifié et implique un coût pour ce pays alors qu'il bénéficiait auparavant d'un gain important. Cette révision des objectifs vis à vis de la Russie peut sembler drastique. Le choix alternatif d'un modèle contraint sur le respect du gain environnemental sans imposer à la Russie une révision de son objectif montre que le taux d'effort devant être appliqué à l'ensemble des pays considérés est de 0,13 %. Ce taux d'effort n'améliore que la situation des pays de l'Ombrelle, à l'exception du Japon.

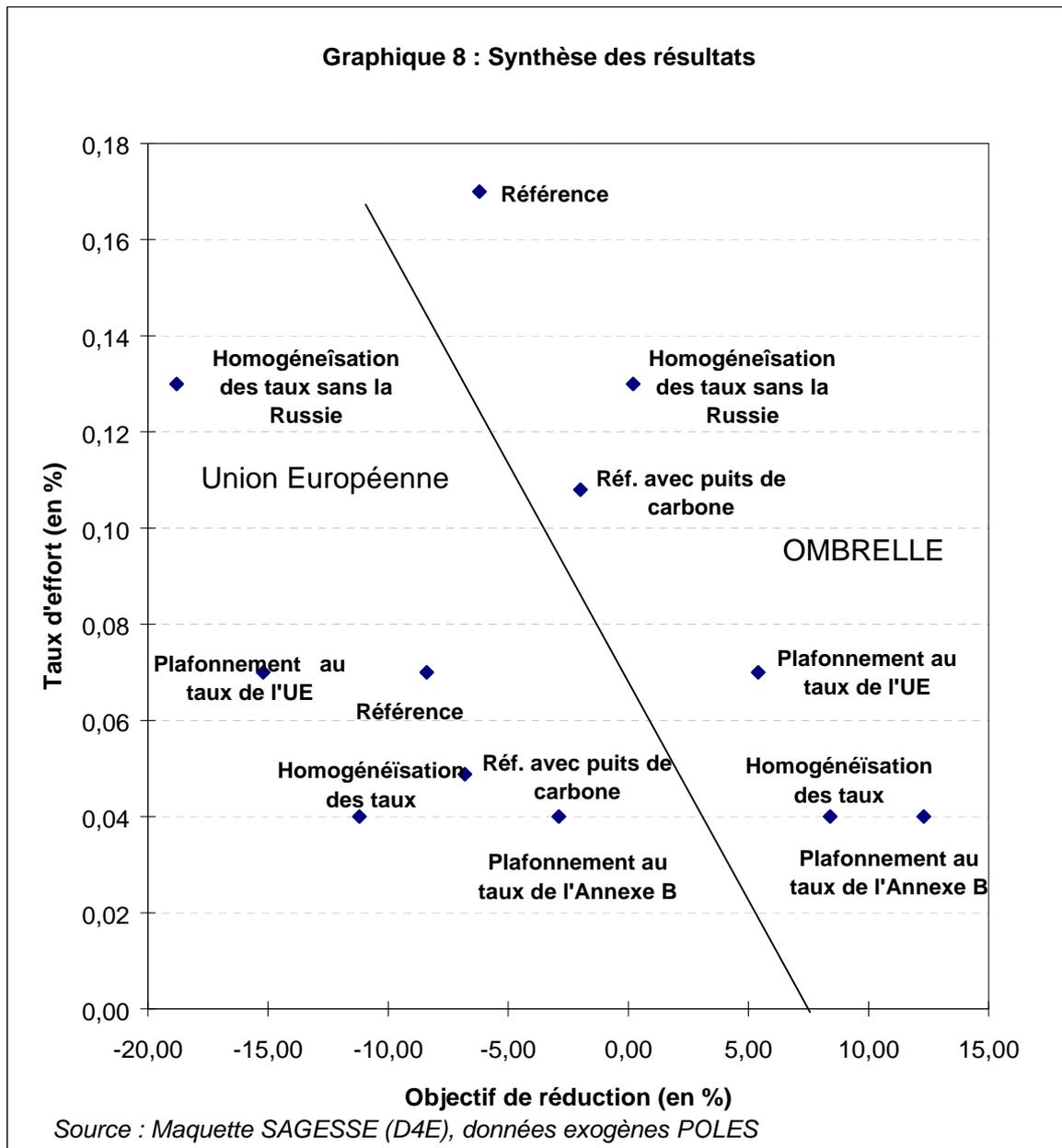
L'offre de permis restant importante du fait du maintien du « hot air » russe, la part des échanges de permis est relativement élevée en regard des réductions effectuées en interne (54 % pour les Etats-Unis et 63 % pour l'Union Européenne). Les quantités échangées sont toujours légèrement supérieures à 400 millions de tonnes et la Fédération de Russie est le seul et unique vendeur net de permis d'émissions négociables.

### Synthèse

L'utilisation des taux d'effort, comme indicateur de comparaison entre les différents pays de l'Annexe B, a permis de mettre en évidence de nombreux résultats. Un plafonnement des taux d'effort permet effectivement de réduire la contrainte financière de certains pays. Néanmoins, la modification des objectifs de réduction non compensée pose le problème de l'intégrité environnementale. Si l'on désire respecter l'objectif global de réduction de l'ensemble des pays de l'Annexe B tel que fixé par le Protocole de Kyoto, force est alors de constater que l'homogénéisation sous contrainte du taux d'effort varie du simple au triple si l'on ne modifie pas l'objectif de la Fédération de Russie. Pourtant, le cas où tous les taux d'efforts sont homogènes est le plus intéressant car le plus différent des autres scénarios. En effet, les quantités d'émissions échangées sont très faibles, peu de pays devant réellement recourir au marché d'échanges de permis d'émissions négociables et les Etats-Unis se trouvent alors en position de vendeurs sur ce marché.

Un autre résultat de cette étude est la mise en évidence des différences existant entre l'Union Européenne dans son ensemble et de la partie de l'Ombrelle constituée des Etats-Unis, du Canada, du Japon, de l'Australie et de la Nouvelle Zélande. En effet, à taux d'effort identique, les objectifs de réduction correspondants sont peu comparables puisque dans les quatre scénarios étudiés, si l'objectif global de l'Union Européenne est toujours une réduction de ses émissions de gaz à effet de serre par rapport à celles de 1990, ce n'est plus le cas pour les pays constituant une part de l'Ombrelle, alors que les objectifs de réduction fixé par le Protocole de Kyoto de ces deux ensembles de pays sont relativement semblables.

En conclusion, les efforts économiques résultant de l'application du Protocole de Kyoto sont très variables selon les pays considérés. Une modification des objectifs aurait un impact non négligeable sur les gains environnementaux, mais aussi sur la répartition des coûts. Toute modification des objectifs de réduction, si l'on veut sauvegarder un gain environnemental, pose avec acuité le problème de la Fédération de Russie et donc celui du hot air russe.



**UNE ETUDE PROSPECTIVE : ELEMENTS SUR LES ALLOCATIONS INTERNATIONALES DE REDUCTIONS D'EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE**

La maquette SAGESSE a été utilisée en hiver 2001 pour une étude sur les allocations internationales de réductions d'émissions de gaz à effet de serre. Dans le cadre des futures négociations internationales sur les engagements de deuxième période (émissions après 2012), plusieurs hypothèses sont envisageables : avoir un processus du type de celui de Kyoto, où chaque Partie décide d'un engagement de réduction, ou élaborer des règles d'allocation des

réductions des émissions de gaz à effet de serre entre les différents pays. Au nom de l'équité, des allocations en fonction de la population ou du PIB du pays sont évoquées.

Cette étude avait pour objet de présenter, à partir de simulations réalisées sur la maquette SAGESSE, les différences observées en terme de taux d'effort (coût des réductions / PIB de 2010) et d'objectif de réduction si, lors de l'élaboration des allocations d'efforts de réduction du Protocole de Kyoto, d'autres règles d'allocation avaient été utilisées. Du fait que l'on se replace dans le contexte de 1997, toute l'étude est menée dans l'hypothèse d'une participation des USA au Protocole.

Dans les deux cas envisagés, la contrainte environnementale est respectée, c'est à dire le montant global des réductions des émissions de gaz à effet de serre de l'ensemble des pays de l'Annexe B<sup>13</sup>. De ce fait, le prix du marché des échanges de permis d'émissions de gaz à effet de serre reste identique, à 50,9\$1990/tC.

Deux règles d'allocation des réductions des émissions de gaz à effet de serre ont été testées :

- la première répartit le montant global des émissions de telle façon que le montant d'autorisations d'émissions accordées à un pays soit proportionnel à son PIB, ce qui permet de capturer à la fois sa taille et son niveau de développement, en lien avec sa consommation énergétique. Cette règle, pour respecter le plafond total d'émissions accordé en 1997, impose un quota de 1,91 tonnes de carbone par unité de PIB en 2010.
- la deuxième répartit le montant global des émissions de telle façon que le montant d'autorisations d'émissions accordées à un pays soit proportionnel à sa population. Cette règle, pour respecter le plafond total d'émissions accordé en 1997, impose un quota de 37,49 tonnes de carbone par unité de population en 2010.

Règle d'allocation proportionnelle à la richesse ou à la population du pays : quels engagements en quantités d'émissions ?

Les résultats obtenus au travers de ces simulations mettent en évidence des modifications dans les objectifs de réduction pour de nombreux pays.

---

<sup>13</sup> Le pourcentage global des réductions est de 5,2 % pour l'ensemble des pays de l'Annexe B, qui recouvre les pays développés. Néanmoins, la maquette SAGESSE utilise les données du modèle POLES qui ne prend en compte que les émissions de dioxyde de carbone, donc le pourcentage de réductions global est de 4,7 % dans ce cadre restreint.

Comparaison des objectifs de réduction obtenus  
(en pourcentage par rapport aux émissions de 1990)

Pays	Objectif de Kyoto	Objectif avec règle utilisant le PIB de 2010	Objectif avec règle utilisant la population de 2010
Etats Unis	-7,0	16,0	20,4
Canada	-6,0	6,5	9,5
<b>France</b>	<b>0,0</b>	<b>-11,7</b>	<b>-6,3</b>
Allemagne	-21,0	-25,4	-23,0
Italie	-6,5	-12,5	-8,0
Grande Bretagne	-12,5	-11,9	-9,6
Reste de l'UE du Nord	-6,1	14,9	18,2
Reste de l'UE du Sud	18,8	17,2	13,7
<b>Union Européenne</b>	<b>-8,0</b>	<b>-8,2</b>	<b>-5,7</b>
Reste de l'Europe de l'Ouest	-4,1	-7,7	-0,4
Pol, Hon, Tchéc, Slov	6,8	9,4	1,8
Reste de l'Europe centrale (Annexe B)	-3,3	-6,4	-23,7
Fédération de Russie (Annexe B)	0,0	-42,8	-51,9
Japon	-6,0	-4,7	-0,2
Australie+Nouvelle Zélande	6,8	33,8	33,1
<b>Annexe B</b>	<b>-4,7</b>	<b>-4,7</b>	<b>-4,7</b>

*Source : SAGESSE, données exogènes POLES.*

Dans le premier cas, l'**Union Européenne** dans son ensemble voit son pourcentage de réduction rester stable. Mais cette apparente stabilité reflète des modifications de traitement entre certains pays. Ainsi la France et l'Italie ont des objectifs de réduction plus drastiques (respectivement -11,7 % et -12,5 % contre 0 % et -6,5 % auparavant), alors que les engagements du reste des pays de l'Union Européenne du Nord voient leur objectif passer de -6,1 % à +14,9 %. Dans le deuxième cas, utilisant le chiffre de population, des résultats sensiblement identiques se retrouvent mais l'objectif de réduction de l'ensemble de l'Union Européenne est assoupli (-5,7 % au lieu de -8 %) et l'objectif de réduction du reste des pays de l'Union Européenne du Nord s'améliore aussi en raison de leur faible population (comparativement aux autres pays composant l'Union Européenne). Les résultats obtenus mettent en évidence que, lors de l'élaboration du « burden sharing », la négociation au sein de l'Union Européenne a été favorable à la France au détriment d'autres pays comme ceux du reste de l'Union Européenne du Nord.

Les différences les plus importantes sont elles qui concernent d'un côté des pays de l'Ombrelle comme les Etats-Unis, le Canada, l'Australie et la Nouvelle Zélande et, de l'autre côté, la Fédération de Russie.

Pour les **Etats-Unis, le Canada, l'Australie et la Nouvelle Zélande**, les objectifs ne sont plus exprimés en réduction par rapport à leurs émissions de 1990, mais les deux règles aboutissent à les autoriser à les augmenter par rapport à leur niveau de 1990 : +16 à +20 % pour les Etats Unis contre -7 % auparavant, et +33 % environ contre +6,8 % pour l'Australie et la Nouvelle Zélande. On retrouve encore une fois l'idée que les pays de l'Ombrelle ont, comparativement aux autres pays, souscrit des objectifs de réduction ambitieux au regard de leur PIB ou de leur population.

Concernant **la Fédération de Russie**, l'allocation de Kyoto est particulière, puisque la stabilisation des émissions au niveau de 1990 s'est avéré être un objectif atteignable sans effort particulier de réduction des émissions, du fait de la récession économique. C'est de ce phénomène qu'est née le terme de *hot air* qui désigne les quotas d'émissions que la Russie n'aura pas besoin d'utiliser dans le cas où elle ne ferait aucun effort de réduction, et pourra donc mettre sur le marché. Si de plus elle adopte des mesures de réduction des émissions, elle pourra proposer à la vente une quantité encore plus importante de quotas, mais ceux-ci auront été obtenus à un coût positif. Les deux règles d'allocation simulées imposent un objectif de réduction important puisque l'objectif passe de 0 % à -43 % ou -52 %. On retrouve encore une fois l'idée que ce pays a, comparativement aux autres pays, souscrit des objectifs de réduction très peu ambitieux au regard de leur PIB ou de leur population.

Si la comparaison en termes de quantités d'émission met en évidence les « anomalies » de l'allocation de Kyoto, un éclairage économique est utile pour quantifier en termes économiques les implications des règles d'allocation envisagées.

**Règle d'allocation proportionnelle à la richesse ou à la population du pays : quels engagements en termes de coûts ?**

Les engagements des Parties au Protocole de Kyoto (dénommés par la suite l'allocation de Kyoto) exhibent des taux d'effort des différents pays relativement disparates<sup>14</sup>. Si les réductions sont effectuées seulement en interne, le taux d'effort varie de 0 % pour la Fédération de Russie à 0,6 % pour les pays de l'Union Européenne du Nord. Avec l'instauration d'un marché de permis entre les seuls pays développés et sans recours au Mécanisme de Développement Propre, les taux d'effort diminuent pour tous les pays considérés, et le taux d'effort maximum reste cependant de 0,22 % pour les Etats-Unis.

On retrouve donc les résultats classiques de moindre coût individuel et global si la répartition de l'effort peut être aménagée à la marge par le recours aux mécanismes de flexibilité.

Maximum et minimum des taux d'effort

		Taux d'effort		
		Objectif de Kyoto	Allocation par richesse (1,91% *PIB 2010)	Allocation par tête (37,49% *POP 2010)
Sans marché de permis	Maximum	0,60 % Reste de l'UE du Nord	0,34 % l'Italie	0,54 % Reste de l'Europe Centrale
	Minimum	0 % Fédération de Russie	0,01 % Fédération de Russie	0,01 % Etats Unis
Avec marché de permis	Maximum	0,20 % Etats Unis	0,09 % pour l'Italie	0,30 % Reste de l'Europe Centrale
	Minimum	-1,31 % Fédération de Russie	-0,07 % Fédération de Russie	-0,01 % Etats Unis

Source : SAGESSE, données exogènes POLES.

Si l'on observe les taux d'effort, leur dispersion est moins importante dans le cadre des deux règles d'allocation que dans le cas de l'allocation de Kyoto. Comme pour l'allocation de Kyoto, l'introduction d'un marché de permis a pour effet de réduire les taux d'effort de chacun des participants, c'est à dire le coût engendré par les réductions des émissions de gaz à effet de serre.

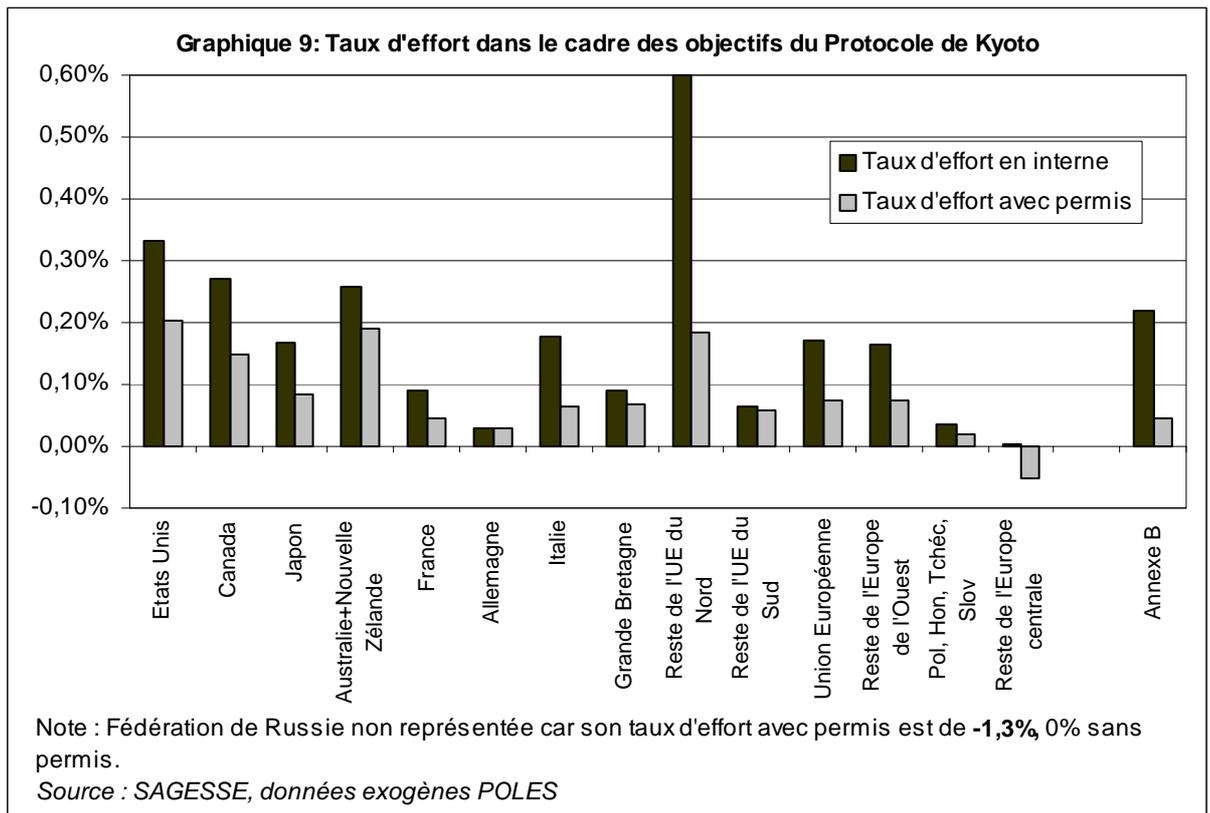
<sup>14</sup> Cf note D4E-D2-01-047 « Quantification de l'effort économique requis par les Parties du Protocole de Kyoto »

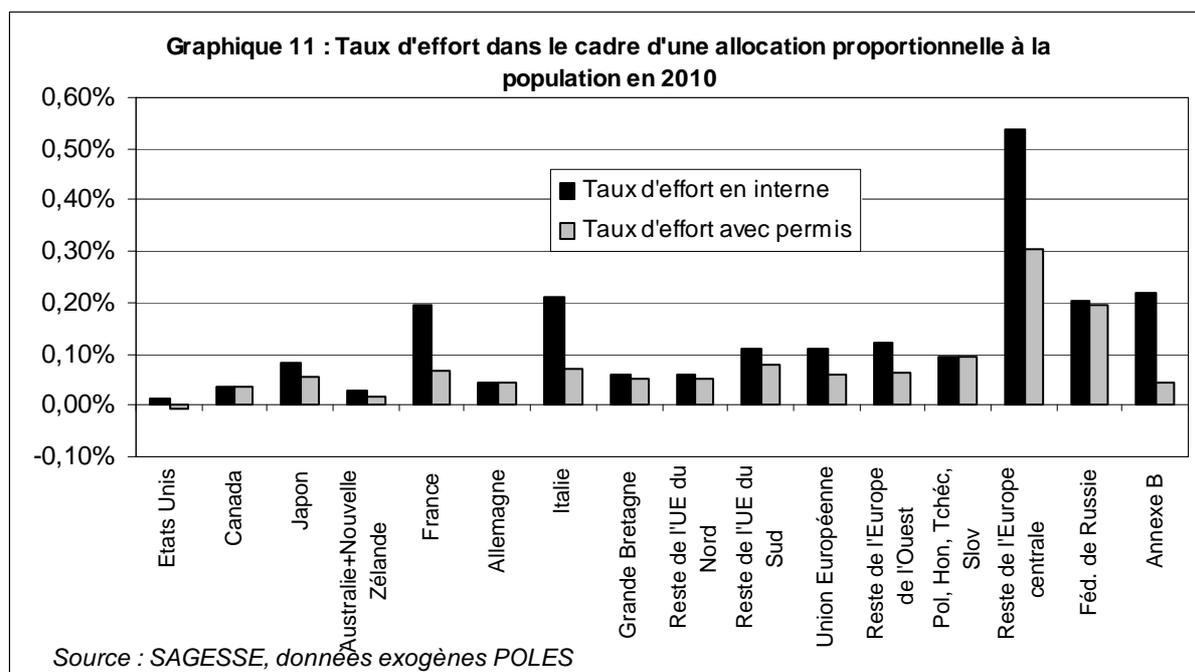
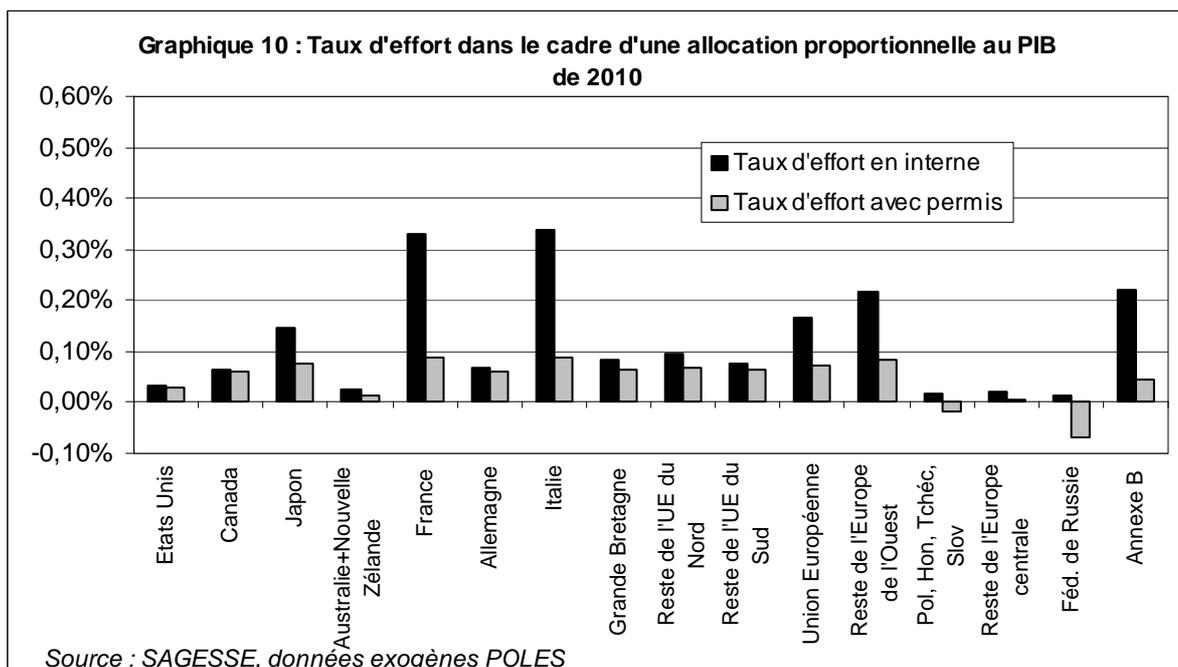
Un des résultats est qu'une règle d'allocation sur des critères objectifs tels que le PIB ou la population aurait permis de 'resserrer' les différences de coût imposés aux pays.

Le fait que de telles règles d'allocation soient plus « égalitaires » se manifeste également sur l'ampleur des échanges de permis entre pays. Le volume total des échanges entre pays acheteurs et vendeurs passe de 422 millions de tonnes de carbone dans le cadre de l'application du Protocole de Kyoto à 133 MtC pour la règle d'allocation en fonction du PIB et 119 pour la règle en fonction de la population.

La France, du fait de son comportement passé de maîtrise de l'énergie et de son important recours au nucléaire pour sa production d'électricité, avait déjà relativement bien maîtrisé une partie de ses émissions de gaz à effet de serre en 1990, ce qui explique qu'il est vite très coûteux pour elle d'obtenir sur son sol national une réduction importante de ses émissions. Et une règle d'allocation par PIB ou par tête exige de la France une réduction de ses émissions par rapport à 1990.

La France et l'Italie méritent un commentaire particulier : dans le cas où une règle d'allocation de type PIB ou population avait été appliquée à Kyoto, ces pays auraient été parmi ceux pour lesquels le taux d'effort en interne était des plus élevés, et auraient donc été financièrement très concernée par le recours aux mécanismes de flexibilité, en position d'acheteur, alors que les pays de l'Ombrelle tels que les USA et le Canada y auraient été relativement indifférents.





En conclusion, la simulation de règles d'allocation de l'engagement de réduction des émissions de gaz à effet de serre montre :

- le caractère très particulier de l'allocation décidée en 1997 lors du protocole de Kyoto ;
- les enjeux économiques importants soulevés par toute règle uniforme. En l'occurrence, la France aurait pu être en position de forte demande de quotas supplémentaires.

Cette étude a simplement examiné les enjeux économiques d'une règle uniforme d'allocation au sein des pays développés, sans aborder la question de la participation des pays en développement à la lutte contre le changement climatique, qu'il sera nécessaire d'aborder, et qui sera liée à la question des engagements de deuxième période.

## CONCLUSION

SAGESSE est un outil pouvant faire l'objet de multiples usages, utiles à la fois pour le MATE et les négociateurs. Ainsi, la maquette :

- a servi à évaluer les options des négociations lors de CoP 6 et CoP 6 bis. Depuis, la maquette est stabilisée dans une nouvelle situation de référence qui intègre les résultats de CoP 7.
- a été utilisée pour éclairer les taux d'efforts induits par les engagements de réduction du Protocole de Kyoto.
- a été utilisée pour examiner rétrospectivement d'autres règles d'allocation.

Néanmoins, du fait de sa construction, SAGESSE est une maquette évolutive et de nombreuses pistes de recherche sont possibles :

- De nouvelles données exogènes seront introduites en fonction des données fournies par POLES pour 2010 avec vraisemblablement d'autres formes de fonction de coût.
- La maquette sera étendue à 2030 lorsque les coûts de POLES seront connus et disponibles
- En fonction des données connues pourraient être intégrées dans la maquette d'autres sources de données provenant de modèles économiques autres que POLES.
- La maquette, moins utilisée désormais pour évoluer les options des négociations sera désormais davantage utilisée pour appréhender la question des engagements futurs.

## Annexe A : Objectifs de réduction des émissions de GES pour les pays de l'Annexe B

**Tableau : Objectif de Kyoto (après répartition au sein de la bulle européenne).**

*Le niveau 100 correspond aux émissions de l'année de référence défini pour l'application du protocole (en général 1990)*

Pays de l'Union Européenne	Objectif de Kyoto	Emissions 1990 (en MtC)	Pays de l'annexe 1, en transition vers une économie de marché	Objectif de Kyoto	Emissions 1990 (en MtC)
Allemagne	79	327,6	Estonie	92	11,1
Autriche	87	20,6	Hongrie	94	27,7
Belgique	92,5	37,3	Lettonie	92	9,7
Danemark	79	19,0	Pologne	94	154,1
Espagne	115	82,4	République Tchèque	92	51,8
Finlande	100	20,5	Slovaquie	92	20,8
France	100	149,1	Ukraine	100	250,9
Grèce	125	28,4	Bulgarie	92	42,9
Irlande	113	14,6	Roumanie	92	72,3
Italie	93,5	141,3	Fédération de Russie	100	818,7
Luxembourg	72	3,7	Lituanie	92	14,1
Pays Bas	94	57,0	Slovénie	92	5,2
Portugal	127	17,4	Croatie	95	nc
Royaume Uni	87,5	198,5	<b>Autres pays annexe 1</b>		
Suède	104	18,9	Australie	108	114,2
Total UE (hors Luxembourg)	92	1132,7	Canada	94	164,6
			Etats Unis	93	1628,0
			Islande	110	0,7
			Japon	94	320,8
			Liechtenstein	92	0,2
			Monaco	92	0,0
			Norvège	101	12,8
			Nouvelle Zélande	100	19,8
			Suisse	92	14,5

*Note : les émissions de 1990 correspondent aux CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> et N<sub>2</sub>O, exprimés en équivalent carbone.*

*Source : UNFCCC ; calculs DEEEE du MATE*

## Annexe B : Le modèle POLES

*L'IEPE (Institut Economique et de Politique de l'Energie) de Grenoble a développé le modèle POLES de simulation du système énergétique mondial à 2030, et une maquette périphérique, ASPEN, qui est un logiciel dédié à l'analyse des systèmes de permis d'émission.*

Le modèle POLES est un modèle de simulation du système énergétique mondial à l'horizon 2030 :

- les évolutions démographiques et économiques, pour chacun des grands pays ou régions du monde sont considérées comme exogènes et incorporées sous forme de scénarios ;
- en revanche, les évolutions de l'ensemble des variables caractérisant la consommation, la transformation, la production et les prix de l'énergie par grande région du monde sont endogènes au modèle.

Les principales utilisations du modèle relèvent de trois grands types d'exercices :

- ***Une prospective détaillée du système énergétique mondial***, par grand pays ou région (38 actuellement).
- ***Une analyse des impacts des contraintes d'environnement global***, exprimées dans les accords internationaux sur la limitation des gaz à effet de serre, avec un calcul des Coûts Marginaux de Réduction par pays et par secteur et une utilisation du logiciel spécialisé ASPEN (Analyse des systèmes de permis d'émission négociables) pour la simulation de « marchés de droits d'émission ».
- ***Une analyse du progrès technique du secteur de l'énergie*** avec la simulation de scénarios de « percée technologique » et une endogénéisation de l'impact de la R & D sur les performances et la diffusion des nouvelles technologies.

C'est un modèle de simulation réursive en pas annuel : la dynamique est donnée, à partir du point initial puis d'année en année, par les ajustements progressifs des variables d'offre et de demande d'une part et de prix d'autre part.

L'horizon prospectif a été volontairement limité à une trentaine d'années, dans le souci de traiter des technologies « explicites » et non « génériques » : on fait ici aussi l'hypothèse que les technologies qui pourront avoir un impact quantitatif significatif en 2030 doivent être au moins identifiées aujourd'hui.

### *Structure du modèle*

Le modèle est construit selon une structure hiérarchisée de modules, interconnectés au niveau national, régional et mondial :

- le plan national intègre pour chaque région 15 modules de consommation avec des équations de demande de type économétrique, 10 technologies nouvelles pour l'offre d'énergie avec modélisation du processus de diffusion, 12 technologies de production d'électricité en

compétition au sein d'un module électrique avec courbe de charge) et des modules de production d'énergies fossiles ;

– les plans régionaux ou mondiaux intègrent les flux d'échanges énergétiques et les modules de prix internationaux, pour les trois grandes énergies faisant l'objet d'un large commerce international, pétrole, gaz naturel et charbon.

Dans sa désagrégation géographique actuelle, le modèle distingue 38 régions. Au sein de chacune d'elle les plus grands pays - ceux du G7, de l'UE et les cinq grandes économies en développement rapide Chine, Inde, Corée, Brésil et Mexique - sont identifiés et traités par des modèles détaillés. Cette caractéristique est particulièrement importante pour l'étude des coûts des stratégies de réduction des émissions de GES et des enjeux de la négociation climat.

### *Développement des énergies fossiles et marchés internationaux de l'énergie*

Outre cette structure de modules, le modèle représente le processus de découverte et de mise en production des énergies fossiles tenant compte à la fois des contraintes de ressource sur le développement à long terme du pétrole et du gaz et de la contribution du progrès technique à la reconstitution de la base de ressources.

L'endogénéisation des prix de l'énergie repose sur la prise en compte des variations du ratio Réserves/Production comme indicateur des tendances relatives des fondamentaux de l'offre et de la demande de pétrole et de gaz. Pour le pétrole un marché mondial unique est considéré alors que trois grands marchés régionaux sont identifiés pour le gaz naturel.

### *Analyse économique des politiques de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> dans le système POLES-ASPEN*

A partir de la projection de référence « sans Kyoto », l'introduction - ou l'internalisation - d'une « valeur du carbone » dans les différents modules permet de construire pour chaque région des courbes de Coûts Marginaux de Réduction (CMR) en 2010 ou en 2030. Ces courbes reflètent la réponse du modèle - en termes de réduction du niveau des émissions - à l'introduction d'une pénalité carbone.

Pour les modules de demande, cette pénalité croissante se traduit par une réduction des consommations/émissions, soit par changement de comportement soit par investissement pour des technologies efficaces, sans que toutefois celles-ci ne soient explicitées. Pour les modules « énergies nouvelles » et « production d'électricité », les impacts découlent des modifications de compétitivité relative de 22 technologies dont les coûts et performances sont explicités.

Le logiciel ASPEN permet le traitement de ces courbes de CMR nationales ou sectorielles, selon une logique microéconomique simple mais rigoureuse. Il permet de calculer : le coût marginal de réduction à l'objectif ; les échanges de permis en volume et valeur pour différentes configurations de marché; le coût total pour chaque Partie ou entité, avec ou sans échange de permis ; enfin le taux d'effort ou rapport du coût total au PIB de chaque pays.

## Annexe C : Différentes équations pour 2010

Pour chaque pays, une équation du type  $P = aQ + bQ^2$ , avec ou sans constante a été estimée. Les simulations ont été effectuées pour des plages de valeur différentes.

### USA

Modèle	F Value	R-2	Adj R-2	Root MSE	constante		Q2		Q	
					valeur	Stat	valeur	Stat	valeur	Stat
0 à 600	3635,92	0,9921	0,9918	16,06197	39,70949	4,57	0,00077944	24,42	-0,17703	-5,05
0 à 600	10666,3	0,9972	0,9971	18,57532			0,00066749	28,19	-0,03536	-1,86
>0	3998,63	0,9929	0,9927	14,9473	56,11206	5,84	0,00082568	24,94	-0,23555	-6,28
>0	10485,5	0,9972	0,9971	18,73477			0,00066749	27,95	-0,03536	-1,84
<110	34701,7	0,9999	0,9999	0,39809	0,47084	1,46	0,00022926	22,79	0,18505	47,31
<110	107913	1	0,9999	0,42235			0,00021943	27,67	0,1897	78,95
>0 et <110	95922,7	1	0,9999	0,44797			0,00021943	26,09	0,1897	74,44
>10 et <110	92959,8	1	1	0,45446			0,00022115	25,26	0,18916	71,19
>0 et <160	97369,1	0,9999	0,9999	0,79794			0,00025827	36,09	0,17898	62,56
>10 et <160	97823,3	0,9999	0,9999	0,79577			0,00025937	35,95	0,17852	61,85
<210	17210	0,9995	0,9994	1,49529	2,64398	2,57	0,00032426	27,19	0,14719	19,57
<b>&lt;210</b>	<b>49588,3</b>	<b>0,9998</b>	<b>0,9998</b>	<b>1,70096</b>			<b>0,00030232</b>	<b>31,96</b>	<b>0,16358</b>	<b>36,23</b>
>0 et <210	20974,8	0,9996	0,9995	1,2588	5,03339	4,21	0,00034409	28,32	0,13237	16,26
>0 et <210	46978,4	0,9998	0,9998	1,74757			0,00030232	31,11	0,16358	35,26
>10 et <210	46145,3	0,9998	0,9998	1,76298			0,00030323	30,74	0,16314	34,62
<310	10455,8	0,9987	0,9986	3,44145	7,35244	3,41	0,00042636	27,83	0,09067	7,41
<310	29177,7	0,9995	0,9995	4,02422			0,00038779	32,06	0,12675	17,57
>90 et <310	103075	0,9999	0,9999	0,61113	75,73048	19,26	0,00068389	51,72	-0,18222	-12,46
>90 et <310	59969,7	0,9998	0,9998	2,76484			0,00043368	39,01	0,09796	14,42

## France

Modèle	F Value	R-2	Adj R-2	Root MSE	constante		Q2		Q	
					valeur	Stat	valeur	Stat	valeur	Stat
0 à 600	26407	0,9989	0,9989	5,98044	-2,74818	-1,01	0,16112	24,87	8,60563	30,33
0 à 600	103103	0,9997	0,9997	5,98197			0,16618	40,12	8,35116	62,84
>0	24808,3	0,9989	0,9988	6,01884	-3,4567	-1,13	0,15982	22,83	8,67124	27,7
>0	101356	0,9997	0,9997	6,03332			0,16618	39,78	8,35116	62,3
<110	467,64	0,9915	0,9894	3,4149	3,22517	1,23	0,42394	3,61	5,25872	4,31
<110	1556,32	0,9971	0,9965	3,51187			0,33188	3,56	6,44004	8,28
>0 et <110	1383,4	0,9971	0,9964	3,7249			0,33188	3,36	6,44004	7,8
>10 et <110	1338,3	0,9974	0,9966	3,78274			0,34881	3,41	6,29455	7,37
>0 et <160	4666,47	0,9986	0,9984	3,6425			0,27135	6,81	6,89626	15,21
>10 et <160		0,9987	0,9985	3,70083			0,27481	6,75	6,85563	14,79
<210	2580,37	0,9965	0,9961	3,85597	1,61199	0,64	0,28466	8,42	6,58389	10,58
<b>&lt;210</b>	<b>9948,83</b>	<b>0,999</b>	<b>0,9989</b>	<b>3,79606</b>			<b>0,26948</b>	<b>11,3</b>	<b>6,92006</b>	<b>20,76</b>
>0 et <210	2139,62	0,996	0,9956	3,93429	2,78885	0,83	0,29574	7,37	6,33847	8,11
>0 et <210	9425,21	0,999	0,9989	3,90008			0,26948	11	6,92006	20,2
>10 et <210	9164,91	0,9991	0,999	3,95444			0,27089	10,87	6,89975	19,8
<310	4609,05	0,997	0,9968	5,179	-3,26698	-1,1	0,17718	8,89	8,44627	16,35
<310	17479,8	0,9992	0,9991	5,19837			0,19318	14,09	7,95505	30,25
>90 et <310	1775,36	0,995	0,9944	4,64504	-44,59253	-2,49	0,02112	0,34	13,72371	6,39
>90 et <310	16669,7	0,9994	0,9994	5,24303			0,17011	10,12	8,4268	25,57

## Japon

Modèle	F Value	R-2	Adj R-2	Root MSE	constante		Q2		Q	
					valeur	Stat	valeur	Stat	valeur	Stat
0 à 600	86428,4	0,9997	0,9997	3,30697	6,73165	4,11	0,02772	78,85	1,08956	21,54
0 à 600	265828	0,9999	0,9999	3,72579			0,02661	104,77	1,2737	48,18
>0	89281,5	0,9997	0,9997	3,17403	8,91985	4,93	0,02808	76,24	1,02971	18,93
>0	261322	0,9999	0,9999	3,75777			0,02661	103,88	1,2737	47,77
<110	16379,5	0,9998	0,9997	0,5794	0,24935	0,54	0,01536	13,15	1,79631	35,56
<110	62257,7	0,9999	0,9999	0,55604			0,01494	17,89	1,81843	64,69
>0 et <110	55340,2	0,9999	0,9999	0,58977			0,01494	16,87	1,81843	60,99
>10 et <110	54124,2	0,9999	0,9999	0,59558			0,01512	16,53	1,8123	58,77
>0 et <160	83893,3	0,9999	0,9999	0,85964			0,0171	28,56	1,75175	64,83
>10 et <160	83229,9	0,9999	0,9999	0,86271			0,01718	28,32	1,74809	63,83
<210	17070,4	0,9995	0,9994	1,50139	1,94721	1,92	0,02112	23,26	1,53611	23,51
<b>&lt;210</b>	<b>55777,6</b>	<b>0,9998</b>	<b>0,9998</b>	<b>1,60383</b>			<b>0,01988</b>	<b>29,38</b>	<b>1,64253</b>	<b>44,55</b>
>0 et <210	16817,7	0,9995	0,9994	1,40573	3,58555	2,78	0,02218	21,79	1,44658	18,66
>0 et <210	52841,9	0,9998	0,9998	1,64778			0,01988	28,6	1,64253	43,36
>10 et <210	51669,2	0,9998	0,9998	1,66609			0,01993	28,21	1,63939	42,57
<310	17204,7	0,9992	0,9991	2,68355	5,18182	3,18	0,02638	30,65	1,20028	14,99
<310	49970,4	0,9997	0,9997	3,07536			0,02436	36,52	1,41969	30,61
>90 et <310	14549,7	0,9994	0,9993	1,62618	43,69312	4,86	0,03738	16,41	-0,14416	-0,5
>90 et <310	79199,1	0,9999	0,9999	2,40593			0,02654	39,2	1,25998	26,15

## Fédération de Russie (Annexe B)

Modèle	F Value	R-2	Adj R-2	Root MSE	constante		Q2		Q	
					valeur	Stat	valeur	Stat	valeur	Stat
0 à 600	525,51	0,9477	0,9459	41,29289	68,01431	2,85	0,00889	11,07	-1,25179	-4,25
0 à 600	1902,05	0,9847	0,9842	43,7109			0,00713	13,14	-0,51338	-3,48
>0	529,28	0,9489	0,9471	40,16316	102,19095	3,59	0,00978	10,99	-1,62283	-4,81
>0	1869,81	0,9847	0,9842	44,08611			0,00713	13,03	-0,51338	-3,45
<210	12461,7	0,9993	0,9992	1,75705	3,31949	2,71	0,00269	25,53	0,34495	14,18
<b>&lt;210</b>	<b>34809,3</b>	<b>0,9997</b>	<b>0,9997</b>	<b>2,03011</b>			<b>0,00249</b>	<b>29,21</b>	<b>0,40098</b>	<b>26,96</b>
<110	20184,3	0,9998	0,9998	0,52195	0,57129	1,35	0,00177	18,6	0,47866	34,74
<110	64808,2	0,9999	0,9999	0,54499			0,00168	22,8	0,49377	59,21
>0 et <110	57607,3	0,9999	0,9999	0,57804			0,00168	21,5	0,49377	55,83
>10 et <110	57614,8	0,9999	0,9999	0,57726			0,0017	21,21	0,49164	54,13
>0 et <160	35931,8	0,9998	0,9998	1,31346			0,00211	24,09	0,44879	34,71
>10 et <160	35633,2	0,9998	0,9998	1,31843			0,00213	23,87	0,44684	34,01
<210	12461,7	0,9993	0,9992	1,75705	3,31949	2,71	0,00269	25,53	0,34495	14,18
<210	34809,3	0,9997	0,9997	2,03011			0,00249	29,21	0,40098	26,96
>0 et <210	16525,1	0,9995	0,9994	1,41812	6,44144	4,68	0,00288	27,84	0,29225	11,49
>0 et <210	32977,3	0,9997	0,9997	2,08574			0,00249	28,43	0,40098	26,24
>10 et <210	32794,2	0,9997	0,9997	2,0912			0,0025	28,28	0,39924	25,88
<310	23972,2	0,9994	0,9994	2,27368	6,04567	4,22	0,00314	42,45	0,25436	11,64
<310	57845,4	0,9997	0,9997	2,85843			0,00291	46,24	0,33412	24,2
>90 et <310	109485	0,9999	0,9999	0,59297	28,10547	7,23	0,00384	40,39	-0,00513	-0,13
>90 et <310	352481	1	1	1,1405			0,00317	94,51	0,27544	36,55

## Chine

Modèle	F Value	R-2	Adj R-2	Root MSE	constante		Q2		Q	
					valeur	Stat	valeur	Stat	valeur	Stat
0 à 600	1936,24	0,9852	0,9847	21,93426	57,33112	3,96	0,00064452	21,83	-0,3423	-8
0 à 600	6116	0,9952	0,995	24,50552			0,00055236	27,26	-0,18988	-9,16
>0	2295,35	0,9877	0,9873	19,6769	101,78097	5,87	0,00071597	22,2	-0,46047	-9,4
>0	6012,34	0,9952	0,995	24,71587			0,00055236	27,03	-0,18988	-9,08
<110	3469,55	0,9988	0,9986	1,25833	1,3199	1,19	0,00020312	16,8	0,04156	5,33
<110	11617,4	0,9996	0,9995	1,28699			0,00019368	20,76	0,04908	10,5
>0 et <110	10326,6	0,9996	0,9995	1,36506			0,00019368	19,57	0,04908	9,9
>10 et <110	11881,6	0,9997	0,9996	1,27101			0,00019823	20,42	0,04672	9,58
>0 et <160	7322,12	0,9991	0,999	2,9086			0,00024658	20,1	0,02538	3,42
>10 et <160	7860,13	0,9992	0,9991	2,80634			0,00025054	20,59	0,02292	3,11
<210	2722,84	0,9967	0,9963	3,75407	6,90233	2,31	0,00031632	20,15	-0,02598	-1,81
<b>&lt;210</b>	<b>8282,93</b>	<b>0,9989</b>	<b>0,9987</b>	<b>4,15992</b>			<b>0,00029037</b>	<b>23,92</b>	<b>0,00236</b>	<b>0,28</b>
>0 et <210	4571,16	0,9981	0,9979	2,69451	18,87026	5,32	0,00036132	23,33	-0,07514	-4,84
>0 et <210	7846,98	0,9989	0,9987	4,27391			0,00029037	23,28	0,00236	0,28
>10 et <210	8320,24	0,999	0,9989	4,15012			0,0002937	23,82	0,00002479	0
<310	4019,3	0,9965	0,9963	5,54473	13,93973	3,39	0,00039312	26,99	-0,08581	-5,33
<310	11280,3	0,9987	0,9986	6,46959			0,00035636	31,42	-0,0381	-4,17
>90 et <310	444822	1	1	0,29419	128,29789	34,72	0,00062518	102,82	-0,41928	-43,9
>90 et <310	82275,4	0,9999	0,9999	2,36053			0,00041589	65,28	-0,08851	-16,67

## Annexe D : Les puits de carbone

Les puits de carbone de chacun des pays de l'Annexe B sont fournis dans ce tableau de manière synthétique, le tableau suivant reprenant toutes les composantes des puits de carbone.

	Emissions 1990	Puits en MtC	Puits en %
Etats Unis	1653,90	38,40	2,3
Canada	163,40	16,60	10,2
France	150,90	0,90	0,6
Allemagne	330,30	1,20	0,4
Italie	141,60	0,70	0,5
Grande Bretagne	208,60	1,20	0,6
Reste de l'UE du Nord	195,20	2,50	1,3
Reste de l'UE du Sud	130,80	1,00	0,8
Reste de l'Europe de l'Ouest	28,70	1,00	3,5
Pol, Hon, Tchéc, Slov	205,80	1,70	0,8
Reste de l'Europe centrale (Annexe B)	402,10	3,90	1,0
Fédération de Russie (Annexe B)	828,40	17,60	2,1
Japon	334,50	13,00	3,9
Australie et Nouvelle Zélande	149,90	10,10	6,7

Sources : Données transmises par la MIES en août 2001 et provenant soit des pays soit de la FAO avec intégration des modifications sur les plafonds tels que définis lors de CoP 7

Pays	Déboisements et reboisements (soumission nationale, fixé à 8,2 pour la Russie) MtC par an	Gestion forestière (soumission nationale si disponible, donnée FAO sinon, et IIASA pour la Russie) Mt C	Autres activités (soumission nationale) MtC par an	Article 3.3 (déboisements et reboisements) MtC par an	Article 3.4 Gestion forestière (compensation des débits de l'article 3.3) MtC par an	Article 3.4 Gestion forestière (au delà de la compensation) MtC par an	Article 3.4 Activités agricoles MtC par an	Article 12 Reboisements dans le MDP MtC par an	TOTAL puits domestiques hors MDP MtC par an
Autriche	-0,2	5,2		-0,2	0,2	0,6		0,2	0,6
Belgique		0,2				0		0,4	0
Danemark	0,1	0,3		0,1		0,1		0,2	0,1
Finlande	-1,1	2,2		-1,1	1,1	0,2		0,2	0,2
France	-1,7	7,6		-1,7	1,7	0,9		1,5	0,9
Allemagne	-0,2	8,5		-0,2	0,2	1,2		3,3	1,2
Grèce		0,6				0,1		0,3	0,1
Irlande	0,9	0,4		0,9		0,1		0,1	1
Italie	0,5	1,2		0,5		0,2		1,4	0,7
Luxembourg		0,1				0		0	0
Pays Bas	0	0		0		0		0,6	0
Portugal		1,5				0,2		0,2	0,2
Espagne		4,5				0,7		0,8	0,7
Suède	-0,1	4,6		-0,1	0,1	0,6		0,2	0,6
Royaume Uni	0,6	2,5	0,3	0,6		0,4	0,3	2,1	1,2
UE	-1,3	39,1	0,3	-1,3	3,3	5,2	0,3	11,6	7,5
Australie	0	0	2,2	0		0	2,2	1,3	2,2
Bulgarie		2,7				0,4		0,3	0,4
Canada	-4,4	9,1	4,6	-4,4	4,4	12	4,6	1,6	16,6
Croatie								0	0
République Tchèque		2,1				0,3		0,5	0,3
Estonie		1,2				0,1		0,1	0,1
Hongrie		1,9				0,3		0,2	0,3
Islande	0	0	0,1	0		0	0,1	0	0,1
Japon	-0,7	11,4		-0,7	0,7	13		3,3	13
Lettonie		2,5				0,3		0,1	0,3
Liechtenstein						0		0	0
Lituanie		1-0				0,3		0,1	0,3
Monaco						0		0	0
Nouvelle Zélande	7,7	4,8		7,7		0,2		0,2	7,9
Norvège	0	0		0		0,4		0,1	0,5
Pologne		5,5				0,8		1,3	0,8
Roumanie		7,4				1,1		0,6	1,1
Fédération de Russie	-8,2	117,5		-8,2	8,2	17,6		8,3	17,6
Slovaquie		3,4				0,5		0,2	0,5
Slovénie		1,9				0,4		0,1	0,3
Suisse	0	0,3	0	0		0,5	0	0,1	0,5
Ukraine		0,1				1,1		2,5	1,1
USA	-7,2	288	10,4	-7,2	7,2	28	10,4	16,5	38,4
Total Annexe B	-14	500,7	17,5	-14	23,8	82,5	17,5	49,2	109,9
Total Annexe B hors USA	-6,8	212,7	7,1	-6,8	16,7	54,5	7,1	32,7	71,4

Source : données transmises par la MIES en août 2001 et provenant soit des pays soit de la FAO