



Programme GICC 2002 – Projet cofinancé par l'ADEME

**Projet : « Efficacité, équité et acceptabilité  
des scénarios d'engagements de réduction  
des émissions de gaz à effet de serre »**

Rapport final

Septembre 2005



N° de contrat ADEME : 02 10 063

Organisme bénéficiaire :  
CNRS, Délégation A

Unité ayant effectué les travaux :  
CIRED, UMR 8568  
45bis avenue de la Belle Gabrielle  
94736 Nogent-Sur-Marne cedex

Responsable des travaux : Jean-Charles HOURCADE

Contact : Jean-Charles HOURCADE, [hourcade@centre-cired.fr](mailto:hourcade@centre-cired.fr)  
Renaud CRASSOUS, [crassous@centre-cired.fr](mailto:crassous@centre-cired.fr)

Téléphone : 01 43 94 73 20



## Résumé du projet :

Ce projet de recherche avait pour objectif d'examiner les différentes règles d'engagement de réduction des émissions de GES pour la période 2012-2050, sous l'angle de leur efficacité, de leur équité et de leur acceptabilité. Il visait à améliorer la compréhension des conséquences économiques et environnementales des multiples possibilités de coordination internationale, et à rechercher les règles d'attribution des objectifs de réduction les plus susceptibles de remporter une large adhésion, notamment de la part des pays en voie de développement et des États-Unis, dans un contexte d'incertitudes très larges autour de la croissance et des coûts d'abatteurs futurs.

Ce projet s'appuie sur l'idée que les futurs engagements ne seront pas indépendants de la vision que les pays auront du bilan net des politiques climatiques, c'est-à-dire de leur estimation des dommages et des bénéfices ancillaires. L'avenir des négociations autour de régimes stabilisés sur le long-terme dépendra donc de la robustesse des évaluations des impacts économiques des différentes règles proposées vis à vis de l'incertitude. Les débats se sont longtemps arrêtés sur la question du partage du fardeau, suscitant d'importants débats sur le caractère équitable de ce partage et de l'allocation de quotas associée, masquant en partie la complexité des règles d'allocation de quotas, et la difficulté d'établir un lien clair entre allocation initiale et facture finale des politiques climatiques. Ce projet revient sur les termes du débat, tente de clarifier la définition des régimes futurs et les principes qui jalonnent les débats. A l'appui de simulations numériques, il souligne la complexité du lien entre allocation initiale et coûts finaux, et l'importance de paramètres jugés mineurs dans le comportement des règles. Il conclut de manière pessimiste sur les possibilités d'un consensus stable dans la durée autour d'une règle d'allocation, du fait des incertitudes notamment, mais aussi du positionnement intellectuel retenu, qui réduit la coordination à un « jeu à somme nulle » dans lequel il faut partager la « richesse carbone ». Le premier écueil peut être modéré par l'introduction d'instruments complémentaires permettant de limiter l'incertitude sur les retombées économiques de l'allocation tout en augmentant les chances d'élargissement de la coordination. Le second exige une évolution profonde de la perception de la coordination.

Dans un second temps, la prise en compte des dommages climatiques potentiels dans le partage du fardeau apporte un éclairage complémentaire sur les modalités d'une coordination acceptable. A travers une analyse théorique puis des applications numériques, elle montre que si l'allocation initiale des quotas doit être le cadre global et unique de coordination des politiques, tout consensus est rendu encore plus fragile, d'une part parce que les incertitudes sur les dommages s'ajoutent aux précédentes, mais aussi parce que l'hétérogénéité des dommages justifie alors des allocations très déséquilibrées, et donc des transferts monétaires très élevés entre régions, ce qui est habituellement jugé inacceptable, et risqué sur le plan macroéconomique.

En conclusion, deux pistes importantes sont esquissées comme de possibles pistes de progrès : (i) l'adoption de régimes fragmentés et hétérogènes, dans lesquels le système de quotas ne doit pas couvrir l'ensemble des politiques climatiques ; (ii) l'inversion du lien entre climat et développement, visant à définir les trajectoires de développement favorables sur le plan climatique et non à faire du développement un bénéfice ancillaire des politiques climatiques.

**Mots-clés :** quotas, règles d'allocation, acceptabilité, incertitude, dommages, post-Kyoto

### **Publications liées au projet :**

Ambrosi P., Hourcade J.C., Hallegatte S., Lecocq F., Dumas P., Ha Duong M., 2003, Optimal control models and elicitation of attitudes towards climate damages, *Environmental Modeling and Assessment*, Vol 8, Issue 3, Pages 133-147.

Gherzi F., Hourcade J.C., Criqui P., 2003, Viable Responses to the Equity-Responsibility Dilemma: a Consequentialist View, numéro spécial *Climate Policy*, 3 (S1): 115-133.

Lecocq F., Crassous R., 2003, International Climate Regime beyond 2012 : Are Quota Allocation Rules Robust to Uncertainty ?, *Policy Research Working Paper #3000*, Banque Mondiale, Mars 2003.

Lecocq F., Hourcade J.C., 2003, Equitable Provision of Long-Term Public Goods : the Role of Negotiation Mandates, *Policy Research Working Paper #3180*, Banque Mondiale, Décembre 2003.

Crassous R., 2003, International Climate Mitigation Regime Beyond 2012: How Do Quota Allocation Rules Perform Under Uncertainty?, Présentation au colloque annuel de l'Association Européenne des Economistes de l'Environnement des Ressources Naturelles (EAERE), Bilbao, 30 juin 2003.

Crassous, R., Mathy, S., 2005, Peut-on étendre le système des quotas échangeables aux PED ?, *Liaison Énergie-Francophonie*, numéro spécial Économie de l'Environnement, Institut de l'énergie et de l'environnement de la Francophonie, Québec, 15 juillet 2005.

## SOMMAIRE

---

<b>Introduction</b>	<b>9</b>
<b>Chapitre 1</b>	<b>11</b>
<b>Partage du fardeau au-delà de 2012 : Les impasses du débat sur l'équité</b>	
1. <i>Des rhétoriques multiples autour de l'équité</i>	12
2. <i>Règle d'allocation de quotas : un objet de négociation complexe</i>	15
2.1. Cadre d'analyse.	16
2.2. Description des règles principales.	19
3. <i>Des critères multiples et parfois contradictoires</i>	28
3.1. Différentes métriques pour mesurer les impacts des allocations de quotas	28
3.2. Une illustration de l'ampleur des tensions	29
<b>Chapitre 2</b>	<b>33</b>
<b>Règles d'allocation ex ante et facture climatique ex post : Évaluation des règles en univers incertain</b>	
1. <i>Un outil d'analyse du fonctionnement du marché de quotas</i>	33
1.1. Description du modèle	34
1.2. Données utilisées	35
2. <i>Faits stylisés sur le comportement des règles d'allocation de quotas</i>	41
2.1. Grand-fathering.	41
2.2. Allocation par tête – proposition d'Agarwal.	44
2.3. Contraction et convergence.	46
2.4. Règle « H. Jacoby »	49
2.5. Règle multi-critères norvégienne.	51
3. <i>Questions transversales.</i>	54
3.1. Seuil et incitations à entrer des PED.	54
3.2. Des questions sur les opportunités d'abattement en Asie.	55
3.3. Incertitudes sur le prix du carbone et les transferts.	57
4. <i>Négociabilité et robustesse à l'incertitude.</i>	58
4.1. Choix de seconde période : instabilité et hétérogénéité	60
4.2. Prise en compte du long-terme : choix évolutifs et renégociation	62
5. <i>Vers des instruments hybrides pour se prémunir contre l'incertitude</i>	63
6. <i>Limites de l'analyse : La non-prise en compte des dommages futurs</i>	65

<b>Chapitre 3</b>	<b>69</b>
<b>Dommages et Partage de la "facture climatique" totale : rôle des règles de gouvernance mondiale et de solidarité intergénérationnelle</b>	
1. <i>Présentation du cadre analytique</i>	70
2. <i>Une règle générale pour le partage du fardeau en première période</i>	73
3. <i>Le rôle crucial du mandat de négociation en seconde période</i>	74
3.1. Solidarité dynastique et statu-quo géopolitique : risques d'instabilité	74
3.2. Solidarité dynastique et adaptation géopolitique : le casse-têtes du jeu à somme nulle	76
3.3. Règle de Solidarité Universelle : vers des régimes plus robustes à l'incertitude ?	78
4. <i>Niveaux de réduction des émissions</i>	78
5. <i>Conclusion</i>	81
<b>Chapitre 4</b>	<b>83</b>
<b>Partage du fardeau climatique selon les règles d'allocation proposées : Quel critère d'acceptabilité ?</b>	
1. <i>Présentation du modèle et résolution analytique</i>	84
2. <i>Simulations</i>	87
2.1. Hypothèses	87
2.2. Prix du carbone	89
2.3. Règles d'allocation usuelles et contrainte de non-redistribution	90
2.4. Transferts et acceptabilité	92
<b>Conclusion</b>	<b>97</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>101</b>
<b>Questions théoriques et méthodologiques liées aux courbes de coûts marginaux</b>	<b>107</b>



## INTRODUCTION

---

La stabilisation des concentrations de gaz à effet de serre, qui semble indispensable pour limiter le changement climatique d'origine anthropique et ses dommages potentiels, est une entreprise mondiale et de long-terme. Si le protocole de Kyoto, en instaurant des quotas contraignants d'émissions sur la période 2008-2012 pour une partie des pays émetteurs, constitue une première étape coordonnée dans la voie d'une maîtrise des émissions totales de GES, il est de connaissance commune qu'il sera nécessaire d'élargir la coordination des efforts le plus largement possible et d'aller plus loin que les engagements actuels du protocole de Kyoto. Mais la recherche d'un consensus sur la forme du régime susceptible de remplir cet objectif d'élargissement se heurte à de nombreuses embûches, tant économiques que politiques. L'**acceptabilité** du régime futur dépend certes du coût absolu du régime, liée à l'**efficacité** des outils mis en place, mais aussi de la perception de son **équité** par les différents acteurs. Passer au crible de ces deux critères les possibles régimes futurs paraît indispensable pour augmenter les chances d'aboutissement des négociations, au sens d'un élargissement réussi avec les États-Unis et les principaux PED, et de la mise en place d'un système efficace de réduction des émissions mondiales.

Les économistes seront tentés de traiter efficacité et acceptabilité comme deux dimensions séparables du problème, occultant ainsi de facto certaines lectures possibles du problème. Dans la majorité des études existantes en effet, l'efficacité du système sera considérée comme acquise grâce au recours à des instruments garantissant la minimisation des coûts dans un monde de premier rang : c'est le cas des permis d'émissions échangeables sur un marché « parfait ». Et les considérations d'équité concerneront uniquement l'allocation initiale des quotas ou aux compensations nécessaires.

Or, l'ampleur des discussions autour de la place de l'équité dans le choix des futures modalités de coordination exige tout d'abord un effort de clarification sur les concepts (principes d'équité) et les objets (règles d'allocation des quotas) qui sont « sur la table » des négociations. Nous proposons dans le premier chapitre une clarification synthétique, car le but n'est pas de proposer une *n<sup>ième</sup>* taxonomie des principes d'équité et de les décliner en règles d'allocation, mais de mettre l'accent sur l'existence de « détails » dans la définition opérationnelle des règles qui se révéleront ensuite d'une importance numérique non négligeable dans l'évaluation des impacts des différentes règles. Cette évaluation est d'ailleurs rendue non-triviale par l'existence de multiples métriques des coûts ou des bénéfices engendrés par les allocations de quotas échangeables.

Dans le second chapitre, une étude numérique des implications des principales règles d'allocation de quotas dans un cadre d'équilibre partiel permet de saisir la complexité de la conversion des montants de quotas initiaux en fardeau final. Nous insistons en particulier sur la difficulté majeure que représente l'incertitude sur l'état du monde futur – population, trajectoires économiques, contenu carbone de la croissance – du fait qu'elle induit des incertitudes fortes sur le prix du carbone, les coûts finaux et les transferts internationaux. Or, un des buts visés dans l'établissement d'un critère d'allocation valable sur le long-terme est qu'il serait susceptible d'offrir plus de visibilité et de capacité d'anticipation aux agents économiques quant aux contraintes futures sur les émissions. Face à cet objectif, et aux incertitudes très larges qui subsistent, il est nécessaire d'envisager des mécanismes additionnels, de manière à créer des régimes hybrides plus robustes permettant de se prémunir contre l'incertitude.

Le troisième chapitre est l'occasion d'élargir la réflexion à la répartition de la **facture totale** du changement climatique. Les dommages dus aux émissions anthropiques de GES sont pour l'instant faibles ou très peu identifiables, et cela a permis jusque là de cantonner la question du partage du fardeau à la facture de réduction des émissions dans les périodes suivantes. Mais dans une perspective de long-terme, les dommages climatiques, supposés potentiellement importants, sans quoi aucune action de réduction ne serait légitime, risquent de peser lourdement sur certaines économies. Dès lors il devient important de prendre en compte dans le partage du fardeau l'hétérogénéité des dommages, leur signe, leur ampleur pour les différentes régions du monde. Nous soulevons cette question d'abord de manière théorique, en montrant que le partage du fardeau dépendra fortement des règles de négociation implicites – le jeu de rapports de force futurs – et de la forme de la solidarité intergénérationnelle qui l'emporte.

Dans le quatrième chapitre, un prolongement numérique permet de comprendre comment la présence de dommages dans le fardeau total modifie considérablement les règles d'allocation des efforts de réduction et les transferts qui en résultent sur le marché des quotas. On verra que l'acceptabilité prend un tour très différent selon l'angle par lequel elle est abordée : règle de non-redistribution de la répartition initiale des revenus mondiaux ou transferts de capitaux par exemple.

# CHAPITRE 1

## PARTAGE DU FARDEAU AU-DELÀ DE 2012 : LES IMPASSES DU DÉBAT SUR L'ÉQUITÉ

---

Si le système des quotas échangeables fut adopté comme base de l'architecture du régime de régulation instauré par le protocole de Kyoto essentiellement à la suite de péripéties politiques<sup>1</sup>, il repose néanmoins sur une logique économique importante :

- la **minimisation des coûts totaux** de réduction pour un objectif quantitatif donné, via l'égalisation des coûts marginaux de réduction des émissions censée se réaliser avec les échanges internationaux de quotas ;

- la possibilité de rendre progressivement acceptable par les pays en développement l'entrée dans un régime de quotas contraignants, en échange de transferts de revenus conséquents permis par une allocation initiale des quotas appropriée. Cette **perspective d'élargissement** est elle-même susceptible d'améliorer l'efficacité environnementale globale du régime, puisqu'elle permet la maîtrise d'une plus grande part des émissions mondiales, mais aussi de l'efficacité économique, puisque l'élargissement du marché de quotas ne peut être en théorie que bénéfique pour la collectivité mondiale (à contrainte d'émissions globale égale).

Cette double logique fait écho au « quasi-réflexe » des économistes sur la séparabilité entre efficacité et équité : dans le cadre théorique classique, l'efficacité est liée à la mise en place d'un marché concurrentiel des quotas, et l'équité est, elle, prise en compte dans l'allocation initiale des quotas. Dans un tel contexte il est évident qu'une faiblesse majeure de ce système réside alors précisément dans la nécessité de négocier l'allocation initiale des quotas, en particulier sous l'angle de l'équité. Ouvrant ainsi la voie à des utilisations stratégiques des multiples rhétoriques de l'équité, l'adoption du système des quotas repose alors sur le pari qu'un compromis est quand même possible autour d'une allocation initiale convenable qui pourrait garantir aux deux parties, schématiquement Nord et Sud, que le mécanisme d'échange des permis leur apporte des bénéfices importants (transferts importants pour le Sud, baisse des coûts de réduction au Nord).

Un débat intense s'est alors développé autour des multiples propositions de règles d'allocation de quotas et des principes philosophiques pouvant permettre de définir une attribution convenable des quotas. Ces discussions n'ont pas véritablement orienté la mise en place du protocole de Kyoto et des objectifs de réduction de la première période d'engagement, mais il est probable qu'elles re-émergeront sous une forme nouvelle lors des négociations autour des régimes futurs.

Ce chapitre vise à **apporter des éléments de clarification** sur les concepts mobilisés par ce débat, en mettant l'accent sur les lieux de blocage qu'il a fait émerger. Nous dressons tout d'abord un bilan synthétique et critique des justifications éthiques très fréquemment invoquées pour justifier tel ou tel mode d'attribution des quotas. Adoptant ensuite une posture pragmatique, nous précisons le paysage des règles proposées et leurs spécifications détaillées. Enfin nous expliquerons pourquoi l'appréciation de ces règles par les décideurs est rendue complexe par la multiplicité des critères d'évaluation

---

<sup>1</sup> Nous ne reprenons pas ici l'historique des négociations, mais on trouvera une synthèse des compromis et malentendus successifs dans le cheminement des négociations de 1992 à 2000 dans (Hourcade, 2003)

## 1. DES RHÉTORIQUES MULTIPLES AUTOUR DE L'ÉQUITÉ

La situation du changement climatique soulève d'importants problèmes d'équité, simplement du fait qu'elle met en exergue des différences Nord-Sud profondes : responsabilités passées et présentes dans l'accumulation de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, consentement à payer pour l'environnement, capacité de payer pour réduire les émissions, vulnérabilités aux changements climatiques. Certes, ces hétérogénéités ne se limitent pas à une dualité Nord-Sud et le tableau d'ensemble est plus complexe (Claussen et McNeilly, 1998), mais la séparation institutionnelle entre pays de l'annexe I et autres pays entérine un mode de pensée très polarisé Nord-Sud, et renforce la focalisation sur l'équité entre ces deux parties du monde. Il n'est donc pas étonnant que le sommet de Rio de 1992 ait accordé une place importante à l'équité dans les débats. La référence à l'équité figure dans le texte fondateur de la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques [UNFCCC, 1992] à deux niveaux :

- l'équité inter-générationnelle est un des fondements de la convention, motivant les générations présentes à supporter des efforts au profit des générations suivantes ;
- l'équité intra-générationnelle transparait dans l'article 3.1, qui conditionne la répartition des efforts des Parties « sur la base de l'équité et en fonction de leurs responsabilités communes mais différenciées et de leurs capacités respectives », dans l'article 4.2.a qui demande aux pays développés de « prendre l'initiative » dans la lutte contre le changement climatique, dans l'article 3.2 qui exige de tenir compte des circonstances spécifiques des pays en développement les plus vulnérables.

Par ailleurs, la veille politique et médiatique autour des négociations renforce la nécessité pour les Parties d'invoquer des ordres de justification acceptables sur la scène internationale, parmi lesquels l'équité constitue une référence difficilement contestable. Enfin, et surtout, les transferts financiers potentiels dans un régime mondial de quotas échangeables donnent aux arguments sur l'équité une portée plus grande, en leur associant les enjeux considérables liés à la répartition initiale des quotas. L'utilisation des arguments d'équité dans les négociations peut alors schématiquement relever de trois attitudes : (i) une source de pouvoir de veto et de négociation pour les pays s'estimant traités d'une manière inéquitable, (ii) un ensemble de repères flous pouvant justifier des comportements de poursuite de l'intérêt national, (iii) un guide de décision pour les situations dans lesquels l'intérêt national n'est pas véritablement en jeu (Ringius et al., 2000).

On recense dans la littérature économique de nombreuses tentatives de synthèse du débat sur l'équité dans l'allocation initiale des quotas. Mais une présentation exhaustive de ces synthèses constituerait plus un catalogue confus de taxonomies différentes qu'un éclaircissement sur les termes du débat. Nous avons donc choisi de reporter uniquement quelques-unes des contributions rencontrées, afin de montrer la multiplicité des points de vue et la difficulté de parvenir à un débat clair.

*Des classifications touffues et peu opérationnelles*

Dans le document de référence que constitue le rapport du troisième groupe de travail de l'IPCC (IPCC, WG III, 2001), on trouve une liste générale de 13 principes d'équité, tirée de (Thompson et Rayner, 1998), et reportée dans le Tableau 1.

Principe d'équité	Interprétation
Égalitariste	Chaque individu possède un droit égal à polluer ou à être protégé de la pollution
Souveraineté	Toutes les nations ont un droit égal polluer ou à se protéger de la pollution : les émissions actuelles constituent un <i>statu quo</i>
Pollueur-payeur	Doit conduire à des pertes de bien-être correspondant aux gains dus aux émissions
Capacité à payer	Les coûts de réduction changent selon le niveau de revenu national
Horizontal	Les pays ayant des caractéristiques similaires supportent les mêmes contraintes ou ont les mêmes droits
Vertical	Les pertes de bien-être varient dans le même sens que la richesse nationale.
Utilitariste	Maximise le bien-être total
Compensation	La situation de tous doit s'améliorer ou rester la même
Maximin de Rawls	Maximise le bien-être du plus mal loti
Justice du marché	Le marché est un processus juste
Consensus	La négociation politique est un processus juste
Convergence	Égalise les émissions par tête
Environnemental	L'environnement est prioritaire

(source : Table 10.9 Equity principles and burden-sharing rules (IPCC, WG III, 2001))

**Tableau 1: classification des principes d'équité – exemple tiré des rapports de l'IPCC**

Une autre présentation des références philosophiques de l'équité est fournie par (Blanchard et al., 2000). Ceux-ci recensent six repères de justice distributive utiles pour les critères d'attribution des quotas :

- *l'égalité des droits*, débouchant sur des allocations au pro rata de la population ;
- *l'égalité utilitariste*, c'est à dire l'égalité du poids de chacun dans la fonction d'utilité collective, qui débouche sur une égalisation des coûts marginaux des politiques climatiques ;
- *l'égalité démocratique*, selon laquelle les individus sont impartiaux et prennent leur décision sous le « voile d'ignorance ». Cela débouche, suivant le « principe de différence » de Rawls, sur la concentration des efforts vers l'amélioration du sort du plus défavorisé. Appliqué au changement climatique, ce principe revient à compenser la pauvreté des pays et leur vulnérabilité par une allocation plus généreuse et un report de la majorité des coûts sur les pays riches ;
- la *responsabilité causale*, qui égalise le pouvoir nocif de chaque tonne de polluant émise, et exige que chacun assume le coût de sa pollution : il s'agit en fait du principe pollueur-payeur, qui se concrétise par exemple avec des réductions proportionnelles aux émissions historiques cumulées ;
- le *mérite*, qui considère juste que l'effort soit récompensé, même s'il crée des inégalités de traitement (il s'agit d'une égalité de traitement de chacun au pro rata de ses résultats). Dans notre cas, cela exigerait des pays très peu efficaces d'un point de vue environnemental le plus d'efforts d'abattement ;
- *l'égalité proportionnelle*, qui, selon la philosophie aristotélicienne, justifie les inégalités par une différence de position sociale (qui sous-entend une valeur du travail individuel). Dans

notre cas, cela revient à se référer à la situation actuelle comme *statu quo*, en allouant les quotas au prorata des droits d'émissions « acquis ».

Cette seconde présentation est éclairante pour montrer que *l'égalité* n'est pas un argument de justice en soi, car toute notion de justice peut être vue comme l'égalité de tous d'un point de vue particulier, la variable pertinente étant alors celle sur laquelle porte l'égalité (Sen, 1992). Cela permet d'entrevoir l'importance et l'insolubilité du débat éthique posé par le changement climatique : au cœur du débat, la variable d'égalité elle-même ne fait pas consensus.

En fait ces deux taxonomies montrent que, malgré leur intérêt heuristique, elles sont très loin de pouvoir être traduites en règles opérationnelles. Par exemple, comment rendre opérationnel le concept de « négociation politique juste » ? Les principes d'égalitarisme et de convergence ne correspondent-ils pas à la même idée, simplement différée dans le temps dans le cas de la convergence ? Comment traduire le « mérite » ?

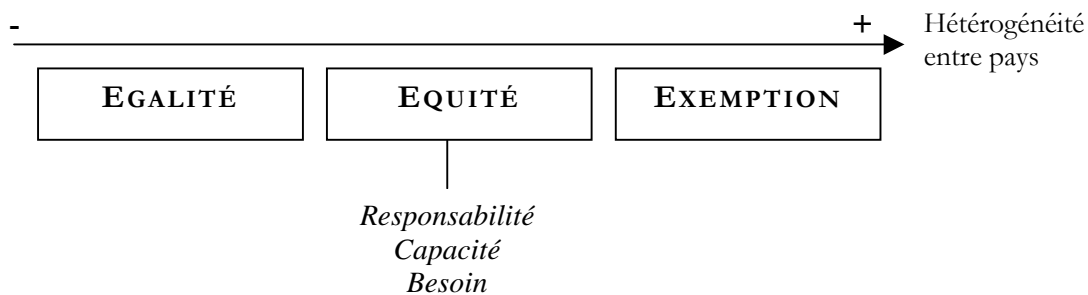
#### *Vers une orientation plus pragmatique des analyses*

(Rose et al., 1998) distinguent trois catégories de principes, qui peuvent aussi se transposer à ces variables d'égalité : ceux qui s'appliquent au résultat du régime de coordination (*outcome-based*), ceux fondés sur l'allocation initiale (*allocation-based*) et ceux fondés sur le processus de négociation (*process-based*). Cette distinction permet de ne conserver, en pratique, que les principes appartenant à la seconde catégorie, fondés sur l'allocation initiale. En effet, il est trivial que l'on peut, au vu des rapports de forces internationaux et de la situation géopolitique mondiale, exclure que le processus de négociation lui-même soit juste ou équitable, ce qui rend caduque la troisième catégorie de principes. De plus, les incertitudes très fortes sur les coûts et les bénéfices futurs des actions de lutte contre le changement climatique rendent les principes fondés sur les résultats quasi-impossibles à mettre en application.

(Ringius et al., 2000) apportent un éclairage intéressant en situant l'équité dans un schéma plus général en trois parties, en situant la discussion sur l'équité par rapport à trois situations d'hétérogénéité entre les protagonistes :

- un contexte d'acteurs peu différents, où l'égalité de traitement s'impose de façon naturelle comme la seule issue pragmatiquement viable ;
- à l'autre extrême, une très forte hétérogénéité avec un décrochage marqué de catégories d'acteurs par rapport à la moyenne, et qui constitue le domaine où seule l'exemption est un principe viable ;
- enfin, ce domaine d'hétérogénéité intermédiaire, où la référence explicite à l'équité devient opérationnellement nécessaire.

Sous cette bannière de l'équité, on trouve ensuite les trois composantes concrètes de la *responsabilité*, de la *capacité* et du *besoin*. Ce découpage est assez parlant pour l'analyse du régime climatique actuel et la construction d'un régime futur. Dans le régime actuel, les PED sont exemptés tandis qu'au sein de l'annexe I, l'égalité a d'abord été annoncée avec un taux unique de réduction par rapport aux émissions de 1990, puis les différences de situations nationales ont justifié un recours à une différenciation des engagements, même si la différenciation actuelle des taux de réduction dans la protocole de Kyoto est le résultat d'une négociation plus que d'une règle de partage équitable (excepté pour la bulle européenne si l'on considère que *l'approche du triptyque*, présentée plus bas, est équitable).



**Figure 1 : Cadre général de pensée de l'équité selon (Ringius et al, 2000)**

L'approche pragmatique de l'équité de (Claussen et McNeilly, 1998) est à rapprocher de la précédente, puisqu'elle mentionne trois repères d'équité pour le cas du changement climatique : la *responsabilité*, le *niveau de vie* et *l'opportunité d'action* ; elle découpe aussi les acteurs en différenciant les niveaux de contraintes pesant sur trois groupes de pays, en fonction de leurs caractéristiques propres selon ces trois critères d'équité. Ces approches quittent petit à petit le champ complexe de la philosophie et de la justice distributive pour revenir à l'objectif plus modeste d'énoncer quelques principes clés qui ne pourront être négligés dans la négociation des régimes futurs.

En fait, le recours des rhétoriques de l'équité constitue une véritable source de blocage de la négociation à cause des utilisations « stratégiques » qui peuvent en être faites : des principes d'équité différents peuvent par exemple déboucher sur des préconisations jugées antagonistes et servant les intérêts de différentes Parties (il suffit de prendre l'exemple de droits d'émissions acquis, autrement dit l'allocation « grand-fathering », *versus* un droit humain fondamental d'émettre du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, i.e. une allocation *per capita*). De ce fait, dans l'élaboration des régimes futurs, il est envisageable qu'il ne reste de ces débats sur l'équité que quelques « incontournables » repères à prendre en compte, qui permettent d'écarter les règles ne les respectant pas. Certains de ces repères ont déjà été retenus dans les textes internationaux : la notion de *responsabilité* (« responsabilités communes mais différenciées ») figure dans la convention de Rio ; le *principe de convergence* progressive vers une égalité des quotas par tête est inscrite dans les accords de Marrakech (1997) ; la prise en compte des différentes capacités de réduction sous-tend l'approche du triptyque utilisée pour négocier le *burden sharing agreement* à l'intérieur de la bulle européenne (cf. présentation de cette règle plus loin).

## 2. RÈGLE D'ALLOCATION DE QUOTAS : UN OBJET DE NÉGOCIATION COMPLEXE

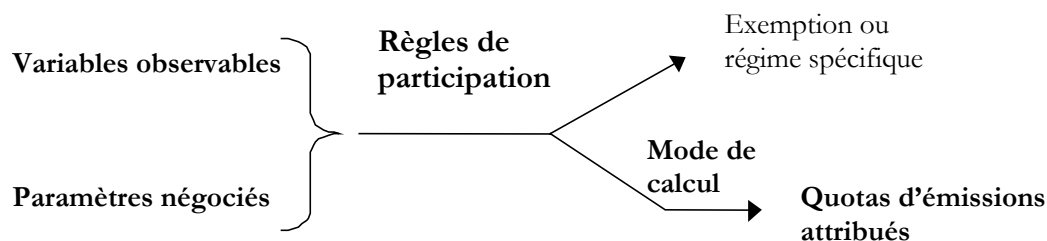
Malgré l'abondante littérature sur les règles de *partage des efforts* ou les *engagements différenciés*, il manquait encore, à notre connaissance, une description précise des différentes règles, du point de vue de leur mise en œuvre concrète. Car c'est bien sûr sur ces détails de mise œuvre - les allocations, les transferts et les coûts occasionnés - et non sur les principes philosophiques généraux que va se polariser la réalité de la négociation. Notre intuition est que certains paramètres, certaines spécifications techniques, certains aménagements qui semblent mineurs *a priori* par rapport au principe central de chaque règle, sont susceptibles de modifier

considérablement les conséquences financières des règles, par rapport à l'image qu'en ont les négociateurs, par rapport à « l'esprit » des règles (c'est-à-dire à la fois aux *principes* sous-jacents, et à l'idée du résultat quantitatif qu'ont *a priori* les négociateurs). Notre démarche consiste donc, dans cette partie, à expliciter une grille d'analyse simple et générale, insistant sur les détails techniques des règles et les mécanismes qu'elles comprennent. Le chapitre 3 nous permettra ensuite de vérifier la réelle importance des spécifications précises des règles d'un point de vue numérique.

Il nous faut mentionner au préalable que certains auteurs ont développé des analyses ayant des points communs avec la nôtre. Dans [Reiner et Jacoby, 1997], [Ringius et al., 1998] ou encore [Grubb et al., 1992], on retrouve ce constat de l'échec de l'équité comme domaine fédérateur autour d'une règle pratique idéale. Ces auteurs adoptent alors ensuite un point de vue plus pragmatique pour aborder les questions politiques et économiques que pose les schémas d'allocation des règles, en mentionnant notamment la primauté des « coûts attendus » parmi les variables pertinentes pour la décision.

## 2.1. Cadre d'analyse.

D'une manière générale, une règle d'allocation de quotas désigne pour chaque période d'engagement le sous-ensemble des pays qui prennent des engagements contraignants et attribue à chacun de ces pays une cible environnementale donnée, à partir de variables observables et de paramètres négociés.



**Figure 2 : forme générale d'une règle d'allocation de quotas**

Nous analysons dans les paragraphes suivants les différents composants de ce schéma.

### 2.1.1. Variables observables.

Les variables observables regroupent l'ensemble des données propres à chaque pays ou ensemble de pays qui sont utilisées pour calculer les différents engagements. La liste de ces variables est potentiellement sans fin, mais deux limitations la réduisent à un ensemble de possibles très restreint : (a) les données doivent être mesurables et mesurées dans tous les pays participants, (b) les données doivent être peu controversées pour servir de base à un accord stable. Au sein du nombre limité de variables respectant ces conditions, figurent le PIB, la population et les émissions, variables pour lesquelles la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques exige des relevés précis dans des communications nationales.



### 2.1.2. *Modes de calcul.*

Au cœur des règles d'allocation, un calcul plus ou moins complexe permet de déterminer les volumes d'émissions de chaque pays. Le spectre des formules utilisées est là aussi extrêmement large, depuis un taux de réduction uniforme ou différencié par rapport à une référence historique (*grand-fathering*) jusqu'à un modèle climatique complet pour calculer les responsabilités passées (proposition brésilienne). Il est pourtant souvent signalé que la complexité des formules peut être un obstacle pour les négociations. Autrement dit celles-ci seront facilitées par des formules relativement simples, peu sensibles aux paramètres négociés (cf. paragraphe suivant), ou permettant un bon contrôle de ces paramètres. La possibilité d'interpréter aisément la valeur de ceux-ci semble un bon point de départ pour faciliter la négociation (cf. règle proposée par H. Jacoby).

Implicitement, les formes fonctionnelles utilisées peuvent être liées au rythme auquel le régime de coordination rejoint la vision de long-terme que l'on en a (cf. différentes formes de convergence des émissions par tête). Cela soulève des questions de répartition inter-générationnelle des efforts non triviales, mais qui sortent du champ de notre propos.

### 2.1.3. *Paramètres négociés.*

Certains paramètres devront être fixés au cours de la négociation pour être inclus dans les calculs des objectifs nationaux. Il peut s'agir par exemple des poids associés aux différents critères pris en compte dans le calcul des taux différenciés ou directement de taux de réduction par an. Ces paramètres fixés par convention entre les Parties rentrent ensuite dans les formules de calcul du volume de quotas alloués.

Il n'y a pas séparation systématique entre objectifs finaux d'émissions et paramètres de partage. Dans certaines règles (contraction et convergence par exemple), l'enveloppe des émissions est fixée explicitement et peut être discutée séparément des modalités de convergence et donc du tempo du partage des efforts, tandis que dans d'autres règles (*grandfathering* avec seuil), l'enveloppe est incertaine, elle ne peut être obtenue que par déduction en fonction du scénario et des paramètres de calcul des quotas. Cette discussion est d'autant plus importante qu'en fait, sur un marché en concurrence parfaite, le volume global de quotas distribués reste le seul paramètre qui fixe le prix du carbone sur le marché pour un scénario donné (voir chapitre 2). Plus généralement, pour toutes les règles, deux l'importance de l'enveloppe dans la fixation des paramètres varie selon l'horizon de discussion :

- dans une perspective de long-terme, la cible visée et l'enveloppe adoptée sont de première importance pour se placer sur des trajectoires permettant d'éviter des seuils de concentration jugés dangereux.

- dans une perspective de court-terme, focalisée sur le déroulement réel des négociations, le volume global des émissions *autorisées* et distribuées sous formes de quotas semble plutôt un produit *ex post* des négociations et des marchandages entre pays, et des valeurs attribuées aux paramètres de la règle adoptée. Un mauvais ajustement de départ à une trajectoire jugée «souhaitable peut être rattrapé à certaines conditions dans les périodes ultérieures.

Les controverses sur les trajectoires optimales de stabilisation de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère (cf. scénarios WG1 *versus* WRE) et l'expérience de Kyoto nous font penser que le second point de vue est plus réaliste, dans l'état actuel des connaissances scientifiques. Cependant, d'un point de vue méthodologique, dans nos simulations, un unique

objectif de réduction globale des émissions sera un repère intéressant pour calibrer les paramètres des règles et les comparer.

#### 2.1.4. *Engagements.*

Une règle d'allocation de quotas fournit à chaque période :

- un sous-ensemble de pays ayant des engagements contraignants, les autres étant exemptées provisoirement de limitations d'émissions;
- un objectif d'engagement pour chaque pays de ce sous-ensemble, le plus souvent sous la forme d'un quota d'émissions, d'un taux de réduction par rapport à une année passée de référence (ce qui revient au même qu'un quota), ou d'un taux de réduction par rapport à un scénario de référence. Ce dernier cas pose cependant un problème insurmontable d'incertitudes sur le scénario à choisir, et sur la possibilité de conclure un accord sur la base d'une référence non-mesurable. C'est pourquoi nous l'excluons systématiquement l'analyse qui suit.

#### 2.1.5. *Règles de participation.*

Les pays hors de l'annexe I devront s'engager aux côtés des pays développés, vu la croissance élevée de leurs émissions et même de leur responsabilité dans le changement climatique (den Elzen et al., 1999), mais la date de leur entrée reste en débat. La grande diversité des situations socio-économiques rend improbable un accord total engageant tous les pays dans un régime coercitif de limitation des émissions. C'est pourquoi, mis à part la possibilité de donner du 'hot air' aux pays qui n'ont aucune incitation à rentrer (pas de pression intérieure, un niveau de vie très faible, peu de capacité d'ingénierie économique pour rentrer sur le marché de carbone), un régime d'exemption doit être prévu pour ces pays. Cela consiste à établir des mécanismes de transition, et des conditions d'entrée des pays dans le régime contraignant. De manière générale, nous recensons trois possibilités principales :

- le régime s'applique à tous dès le départ, prévoyant de prendre en compte les différences de capacité à payer, et pouvant distribuer du hot air à certains pays (cf. règle d'Agarwal);
- un seuil *statique* détermine le critère d'entrée des pays en voie de développement, ce seuil porte par exemple sur le PIB par tête;
- un seuil *dynamique* sépare les pays engagés des pays exemptés. Cette possibilité, mentionnée dans (den Elzen et al., 1999) est cependant très peu explorée.

Il faut noter que l'exemption temporaire du tout régime contraignant via un seuil d'entrée va dans le même sens que la prise en compte, parmi les variables observables utilisées dans une règle, d'une mesure de la capacité de payer ou du niveau de développement : dans les règles présentées ou étudiées dans le dernier chapitre, le lecteur rencontrera ces deux possibilités.

Enfin, instaurer un régime d'exemption et des conditions de participation exige d'adopter un point de vue de moyen ou long-terme, et de jeter un regard critique sur les dates d'entrée des principaux pays en voie de développement, qui peuvent, dans le cas de scénarios pessimistes sur la croissance des PED, être repoussées de plusieurs décennies.

## 2.2. Description des règles principales.

Nous procédons ci-dessous à une revue des règles d'allocation à travers cette grille de lecture. Cette énumération ne contient aucune nouvelle règle originale, et toutes les règles mentionnées correspondent à des propositions faites lors des négociations ou dans la littérature économique. Certaines règles ont été décrites avec de nombreux détails ou ont fait l'objet d'études poussées, tandis que d'autres sont restées à l'état de propositions grossières, peu quantifiées et jamais testées. Nous pensons avoir rassemblé ici la majeure partie des informations concernant les différentes propositions, même s'il est toujours possible que nous ayons négligé une proposition ou une étude spécialisée.

### 2.2.1. *Taux de réduction uniforme.*

Cette approche est la plus communément utilisée dans les accords internationaux de partage d'une ressource limitée, comme les quotas de pêche multinationaux (Stern, 2002) ou les quotas laitiers en Europe (Burton, 1985), voire le système de quotas de SO<sub>2</sub> mis en place aux États-Unis (Joskow et al., 1999), probablement car elle est simple et contrôlable. Elle reflète la notion largement acceptée dans le droit international de la primauté des « droits acquis » (Stern, 2002). L'engagement pris à Rio en 1992 de revenir au niveau d'émissions de 1990 en 2000 et plus tard dans le Protocole de Kyoto en 1997 de réduire en moyenne de 5 % les émissions par rapport à cette même référence de 1990 procèdent de cette logique.

**Variables observables** : émissions passées d'une année de référence.

**Formule** : aucune.

**Paramètres négociés** : taux de réduction annuel ou moyen par période, année(s) de référence<sup>2</sup>.

**Engagements** : cette règle fournit des quotas par pays.

**Transitions** : la règle elle-même ne contient aucune spécification pour l'entrée des pays en voie de développement, mais il est indispensable d'en établir, pour la rendre acceptable aux pays qui envisagent une forte croissance future. Un seuil portant sur le PIB par tête est souvent proposé. La différenciation des taux, et notamment la possibilité d'attribuer un taux maximum d'augmentation pour les pays en voie de développement, peut rendre inutiles les mécanismes de transition. Les deux règles suivantes procèdent de cette logique.

### 2.2.2. *Multi-critères – Proposition norvégienne.*

Il s'agit ici plus d'une famille de règles que d'une unique règle. Les propositions de la Norvège (1996), de l'Australie (1997) et de l'Islande (1997) à l'AGBM relèvent de cette logique, et le cas norvégien a été repris plusieurs fois dans des analyses comparatives, c'est pourquoi nous nous concentrons sur celui-ci ci-dessous. Le lecteur trouvera une étude comparative consacrée exclusivement à différentes règles multi-critères dans [Ringius et al., 1998], et retrouvera la

---

<sup>2</sup> Le taux de réduction peut être différencié par grands groupes de pays ; l'année de référence peut être différente pour certains pays, comme c'est le cas pour certains pays d'Europe de l'Est dans le Protocole de Kyoto, pour prendre en compte des conjonctures particulières.

proposition norvégienne comparée à une proposition française de convergence dans [Reiner et Jacoby, 1997].

**Variables observables** : ce sont les trois critères mentionnés dans la proposition norvégienne : émissions par unité de PIB, revenu par tête, émissions par tête. De nombreux autres critères ont été proposés au cours des négociations – part des énergies renouvelables par l’Islande, dépendance de l’économie en énergies fossiles par l’OPEP, surface du territoire par la Russie... – mais le problème de la disponibilité et de la fiabilité des données est particulièrement important ici.

**Formule** : un taux de réduction national est obtenu par addition des trois critères normalisé par leur moyenne mondiale et pondérés par des poids négociés.

**Paramètres négociés** : les poids relatifs à chaque critère, un facteur d’échelle (en supposant la somme des poids égale à 1, il est nécessaire de rendre ce facteur explicite) qui est relatif à la cible environnementale que l’on se fixe, au moins sur le court-terme, une année de référence pour les émissions.

**Engagements** : la formule fournit un taux de réduction national, qui doit ensuite être appliqué à des émissions de référence pour fournir un montant de quotas.

**Transitions** : L’adoption de plusieurs critères est idéalement censée prendre en compte les spécificités de tous les pays, et donc ne nécessite pas de transition. Cependant, la proposition norvégienne, initialement destinée à l’annexe I uniquement, ne prévoit pas la possibilité de taux de croissance positif des émissions, et donc rend impossible la participation de la majorité des pays en développement dès la période suivant Kyoto. Il faut alors soit adopter un seuil d’entrée ou modifier la formule pour permettre aux taux de réduction de changer de signe.

### 2.2.3. Capacité de payer – Proposition de Jacoby.

La capacité de payer est très souvent au centre des propositions et des analyses, notamment dans les propositions multi-critères (cf. ci-dessus) et celles plus particulièrement centrées sur la cette variable de la Pologne (1997), l’Estonie (1996), la Russie (1995) et la Corée du Sud (1997)<sup>3</sup>. Fondées sur la mesure du PIB par tête, ces proposition sont restées cependant assez vagues. Le paradigme de la capacité de payer est probablement mieux représenté par une proposition de (Jacoby et al., 1999), destinée à faire participer les pays en développement progressivement. Nous nous concentrons donc sur cette règle ci-dessous.

**Variables observables** : une mesure du bien-être par habitant, représentée par la consommation totale dans le papier original. Il faut noter que la capacité de payer peut être représenté a travers plusieurs variables : PIB par tête, croissance du PIB, croissance du PIB par tête, etc.

**Formule** : la formule se décompose en deux parties : si la mesure du bien-être individuel  $w$  est supérieure a un seuil  $w^*$ , le taux de réduction exigé est d’autant plus rigoureux que la différence ( $w-w^*$ ) est importante ; si cette mesure est inférieure au seuil  $w^*$ , le pays est exempté d’engagement. Mathématiquement, cela s’écrit ainsi :

---

<sup>3</sup> Ces pays constituent le *capacity group* dans le récapitulatif des proposition à l’AGBM proposé par [CICERO-ECN, 2001].

$$\eta_t = \left( \frac{\dot{C}}{C} \right)_t = \begin{cases} \gamma - \alpha \cdot (w_{t-1} - w^*)^\beta & w_{t-1}^{\text{ref}} \geq w^* \\ \eta_t^{\text{ref}} & \text{otherwise} \end{cases}$$

**Paramètres négociés** : les quatre paramètres  $(\alpha, \beta, \gamma, w^*)$  doivent être négociés.  $\alpha$  est lié au taux de réduction de court-terme,  $\beta$  au taux de réduction de long-terme,  $\gamma$  au “sursis” initial et  $w^*$  au seuil de participation. Afin d’obtenir les montants de quotas, il faut fixer une référence d’émissions.

**Engagements** : cette règle est posée en termes de taux de réduction. Des émissions de référence permettent de distribuer des quotas.

**Transitions** : La transition fait partie intégrante de la règle.

#### 2.2.4. *Allocations per capita – Proposition d’Agarwal.*

Dans une publication provocatrice de 1991, A. Agarwal fit la proposition de passer instantanément à une allocation par tête des droits d’émissions, pour éviter ce qu’il a appelé “un nouveau colonialisme environnemental”. Cette idée s’appuie sur la notion de droit universel et fondamental à émettre. Ce concept suscite un intérêt certain dans les négociations, mais soulève aussi des réserves importantes. (Godard, 1999) souligne par exemple le non-sens de l’égalité des émissions par tête dès qu’il y a un marché, puisque les émissions effectives ne sont alors plus du tout égalisées par tête. De plus, le maniement des concepts de *culpabilité* ou de *responsabilité* reste extrêmement difficile parce qu’il s’agit de les appliquer à un cadre inter-générationnel; [Claussen et al., 1998] prétend par exemple qu’il est nécessaire de prendre en compte le futur autant que le passé pour les calculs de responsabilité. Pour la mise en place de cette allocation, des problèmes institutionnels et des questions d’équité intra-nationale se posent selon si les droits seront attribués aux individus ou confiés aux états. Enfin, le besoin individuel de services donnant lieu à des émissions n’est certainement pas uniformément égal, puisque dépendant des conditions climatiques (besoin de chauffage) et spatiales (besoin de mobilité) de vie (Neumayer, 2002), des ressources de production d’énergie (ressources fossiles, hydroélectriques, autres renouvelables, géothermie, etc.).

**Variables observables** : population seulement. Pour éviter de créer des incitations à instaurer des politiques natalistes, arguments que certains auteurs utilisent pour rejeter cette proposition, mais dont nous n’affirmons pas la pertinence, plusieurs idées ont été émises, comme par exemple la prise en compte de prévisions ex ante, ou la comptabilité de la population adulte uniquement.

**Formule** : le niveau de population est multiplié par un droit d’émissions par tête pour donner le montant de quotas national.

**Paramètres négociés** : le montant du droit individuel d’émissions.

**Engagements** : la règle fournit des droits individuels et des quotas nationaux.

**Transitions** : Aucune transition. Cette absence de transition est d’ailleurs susceptible de rendre la règle inacceptable par l’ensemble des pays de l’annexe I, pour lesquels le fardeau à supporter dès la première étape serait trop disproportionné (cf. chapitre 2).

### 2.2.5. Contraction and convergence – Proposition de GCI.

La notion double de *contraction et convergence* a été promue notamment par l'organisation non-gouvernementale Global Commons Institute. Leur proposition fusionne les concepts de grand-fathering à court-terme et d'égalité des émissions par tête sur le moyen ou long-terme ; *contraction* signifie que l'enveloppe globale des émissions doit diminuer, *convergence* implique de glisser de la répartition actuelle des droits *de facto* vers une répartition par tête (celle-ci étant ici encore considérée comme l'idéal équitable). De nombreuses analyses et comparaisons de règles prennent en compte cette règle, du fait qu'elle semble pour beaucoup une piste de compromis entre pays industrialisés et pays en développement. Nous décrivons ici en termes précis la proposition de GCI, mais de nombreuses possibilités relevant du même esprit sont possibles, notamment en faisant varier la formule de convergence.

**Variables observables** : population courante et émissions de référence.

**Formule** : la formule principale donne la répartition entre pays des parts du volume global des émissions autorisé, selon une pondération dynamique de la part dans les quotas précédents et la part dans la population mondiale :

$$Quota(c,t) = Total\_Quota(t) \cdot \left[ \left( \frac{Pop(c,t-1)}{Total\_Pop(c,t-1)} - \frac{Quota(c,t-1)}{Total\_Quota(c,t-1)} \right) \cdot e^{-\alpha \cdot (Année\_Convergence - t)} + \frac{Quota(c,t-1)}{Total\_Quota(c,t-1)} \right]$$

**Paramètres négociés** : l'enveloppe globale des émissions, i.e. une trajectoire jugée optimale ; l'année de convergence vers le régime d'allocation par tête

**Engagements** : Cette règle fournit d'abord les parts nationales du "gâteau" des émissions mondiales. La négociation d'un volume global permet de calculer les montants de quotas nationaux associés.

**Transitions** : Aucune transition, puisque cette règle est elle-même une transition vers le régime d'allocations par tête.

### 2.2.6. Responsabilités historiques – Proposition brésilienne.

Le Brésil a déposé une proposition originale à Berlin, fondée sur le concept de responsabilité et le calcul des responsabilités des pays via leurs émissions cumulées dans le temps. Prise très au sérieux sur la scène internationale, cette proposition a été revue et corrigée par une équipe de recherche, et notamment par le RIVM, si bien que nous disposons d'une substance conséquente pour décrire cette règle. Pour les spécifications techniques, le lecteur se reportera à (den Elzen et al., 1999), il y trouvera aussi les limitations de la règle concernant la prise en compte des gaz à effet de serre autres que le CO<sub>2</sub> et des émissions LULUCF.

**Variables observables** : séries temporelles des émissions passées. La disponibilité et la fiabilité des données sont des questions fondamentales. Certains auteurs mentionnent aussi l'évolution

des frontières comme un problème fondamental, mais l'influence de ces modifications sur les calculs de responsabilité n'est pas quantifiée, aussi nous restons prudents sur cette critique.

**Formule** : le module de calcul des responsabilités de chaque pays repose sur un modèle climatique. Celui-ci permet de calculer les contributions des émissions historiques de chaque pays au réchauffement moyen de l'atmosphère. Les responsabilités sont ainsi traduites en *émissions effectives*. Le volume de réductions est alors proportionnel à la responsabilité, i.e. à la part des émissions effectives de chaque pays.

**Paramètres négociés** : le module climatique doit être paramétré d'une manière satisfaisante. Une année de départ pour comptabiliser les émissions est nécessaire. Le volume global des réductions à réaliser par rapport à une année de référence est aussi un paramètre indispensable

**Engagements** : la règle fournit des parts de fardeau à supporter proportionnelles aux responsabilités, qui sont traduites en quotas en les appliquant au volume global des réductions négocié par rapport à des émissions de référence.

**Transitions** : la proposition initiale fut limitée aux pays de l'annexe I, mais l'équipe du RIVM suggère de l'étendre à tous les pays, en y adjoignant un seuil statique ou dynamique. La proposition originale fait aussi mention d'un fond de développement propre destiné à engendrer des actions dans les pays non-participants, et financé par les pénalités de non-observance.

#### *2.2.7. Approche par menu – Proposition japonaise.*

Le Japon a fait à l'AGBM deux propositions successives en 1996 et 1997, fondées sur un régime fragmenté de menu d'options d'efforts. La sélection d'une option pour chaque pays est laissée au choix des pays (1<sup>ère</sup> proposition) ou conditionnée par des seuils (2<sup>nde</sup> proposition). L'esprit de cette règle met en pratique la différenciation « verticale » des engagements et doit être rapprochée de la proposition de (Claussen et McNeilly, 1998) de distinguer des groupes engagés selon des critères différents.

**Variables observables** : aucune dans la 1<sup>ère</sup> proposition, émissions par tête et émissions par unité de PIB dans la 2<sup>nde</sup>, pour déterminer le régime d'engagement des pays.

**Formule** : Aucune formule, mais simplement un menu de type d'engagement. Dans la 1<sup>ère</sup> proposition, les pays doivent choisir entre un plafond d'émissions par tête, ou un pourcentage de réduction de type grand-fathering par rapport aux niveaux d'émissions de 1990. Dans la seconde proposition, le régime de base est celui de Kyoto, avec une réduction de 5% de type grand-fathering, mais deux régimes optionnels sont accessibles sous certaines conditions, permettant des taux plus faibles, dépendant des émissions par unité de PIB ou des émissions par tête.

**Paramètres négociés** : les niveaux de seuil ou les intervalles conditionnant la possibilité de choisir telle ou telle option dans le menu, le taux de réduction dans chaque option, une année de référence pour les émissions.

**Engagements** : cette règle fournit des taux de réduction, il est nécessaire de fixer une référence pour obtenir des montants de quotas.

**Transitions** : ces propositions s'adressent uniquement à l'annexe I, mais la seconde proposition mentionne l'intérêt de taux différenciés pour faire participer les pays en développement.

### 2.2.8. *Égalisation des coûts marginaux – Proposition australienne.*

Cette règle est la seule qui soit fondée sur le résultat attendu des allocations de quotas (cf. classification de (Rose et al., 1998)). Nous avons déjà mentionné les difficultés d'implémenter de telles règles, mais nous mentionnons celle-ci car elle fait partie des propositions à l'AGBM, avec celle de la Nouvelle-Zélande en 1996. L'esprit de cette règle est d'égaliser les efforts supportés par les pays et de minimiser le coût des politiques climatiques en égalisant les coûts marginaux : cela revient en quelque sorte à faire le travail du marché de permis dans l'allocation elle-même. Cependant les incertitudes sur les coûts futurs, et même la complexité de leur évaluation rendent impraticable une telle proposition. Enfin, la rigueur de l'argument qui lie effort supporté et coût marginal d'abattement est loin d'être évidente.

**Variables observables** : courbe de coût marginal d'abattement de chaque pays (cf. annexe 1 pour les questions soulevées par ce type de données).

**Formule** : égalisation des coûts marginaux d'abattement, en utilisant les fonctions inverses des courbes de coût d'abattement.

**Paramètres négociés** : le niveau du coût marginal d'abattement égalisé.

**Engagements** : soit un volume d'abattement soit un pourcentage de réduction, par rapport à une année de référence. Cela dépend de la présentation de la courbe de coût marginal d'abattement.

**Transitions** : L'application d'une telle règle à tous les pays limite l'espace de développement des PED (selon leur propre argumentaire) et devient donc inacceptable par ceux-ci. Les différences de pouvoirs d'achat posent aussi question quant à l'imposition d'un unique prix du carbone (cela revient à imposer une taxe uniforme mondiale).

### 2.2.9. *Approches bottom-up – Tryptique européen et multi-secteurs.*

L'ensemble des règles citées jusque là relèvent d'une démarche top-down, c'est-à-dire attribuant des quotas à partir d'indicateurs globaux nationaux. Les règles qui sont présentées dans ce paragraphe dérivent d'un point de vue différent, partant des possibilités techniques sectorielles de réduction pour obtenir des réductions nationales. La première étape consiste donc à découper l'économie en différents secteurs pertinents pour la différenciation sectorielle des réductions potentielles. Puis des montants de réduction possibles sont évalués pour chaque secteur, avant de sommer l'ensemble de réductions obtenues pour proposer une cible nationale. Cette approche est censée prendre en compte avec une précision accrue les spécificités nationales, en se focalisant sur la notion d'*opportunités* de réduction des émissions. Mais les réductions sectorielles potentielles établies dans la règle n'ont aucune valeur prescriptive, seul la réduction nationale finale est un engagement, les pays sont donc libres de répartir cette réduction globale comme ils l'entendent.

Actuellement deux règles de ce type ont été proposées :

- **la règle du Tryptique**, détaillée dans (Phylipsen et al., 1998) pour l'annexe I, et dont l'élargissement au niveau mondial est étudiée dans (Groenenberg et al., 2000). Cette règle a servi à différencier les réductions au sein de la bulle européenne pour les objectifs de Kyoto. Elle est fondée sur trois secteurs : industrie lourde, production d'électricité et secteur domestique. Des hypothèses de croissance, de progrès technique et de



substitutions technologiques permettent d'établir des réductions possibles pour les deux premiers secteurs, tandis que le troisième est soumis à une règle de convergence par tête.

- **La règle multi-secteurs**, qui représente une amélioration de la précédente, dans le sens où elle permet un niveau de détail plus élevé. Dans (Jansen et al., 2001), on trouve une proposition et une analyse détaillée de cette règle. Dans cette étude, le découpage est effectué selon 7 secteurs : production d'électricité, ménages, transport, industrie, services, agriculture et déchets. Pour chacun de ces secteurs, des hypothèses de croissance et de changement technique sont proposées. Cela permet de calculer des réductions potentielles par secteur d'activités puis au niveau national. Enfin les auteurs proposent de rajouter des autorisations d'émissions supplémentaires selon certains facteurs spécifiques comme le climat, la densité de population, le type d'agriculture, la situation transitoire de certaines économies, les ressources en énergies renouvelables.

Nous pouvons résumer les approches bottom-up dans une même description :

**Variables observables** : description précise des économies nationales et des circonstances nationales (climat, géographie, urbanisation).

**Formule** : somme des réductions sectorielles potentielles, après avoir appliquée une règle spécifique à chaque secteur.

**Paramètres négociés** : Chaque sous-règle sectorielle doit être négociée, ainsi que les hypothèses de croissance et de progrès technique.

**Engagements** : Les deux propositions ci-dessus fournissent un montant de quotas final.

**Transitions** : Dans l'approche multi-secteurs les auteurs proposent un seuil d'entrée et une période d'ajustement fondés sur le niveau de PIB par tête.

Nous insistons sur le fait que la quantité de spécifications techniques sur les secteurs, et en particulier sur le changement technique, rend complexe la simulation de telles règles sur le moyen ou long-terme, car les incertitudes deviennent très importantes.

### 2.2.10. Synthèse.

Le tableau récapitulatif de la page suivante regroupe les règles étudiées d'une manière synthétique. A la lecture de ce tableau, on aperçoit la complexité de l'objet de négociation que peut être une règle d'allocation de quotas. L'adoption de l'une de ces règles dépendra en fait de l'évaluation *ex ante* du fardeau réel à supporter que les gouvernements pourront faire. Cette évaluation dépendra en amont de l'évaluation des quotas alloués grâce à cette règle ; chacun devant se soucier non pas seulement de son propre quota, mais aussi de la quantité de quotas allouée aux autres Parties, qui conditionnera l'état du marché, en particulier le niveau du prix du carbone. Or même l'évaluation des quotas alloués sur plusieurs périodes futures selon une règle donnée n'est pas triviale, pour 3 raisons :

- **la multiplication des paramètres à négocier**, dès que l'on se dirige vers une règle subtile tenant de prendre en compte les différentes notions de responsabilité, capacité, besoin et/ou convergence des émissions par tête.
- **Pincertitude sur certaines variables observables** dans le futur et nécessaires au calcul des quotas alloués.
- **Pincertitude sur l'entrée des pays en développement** (date et conditions d'élargissement de l'enveloppe globale des quotas lors de l'élargissement).

Dès lors le passage de la règle à négocier à une évaluation du fardeau final nécessite une capacité d'analyse numérique, puisqu'il n'est plus possible d'établir un lien direct purement formel entre type d'allocation et bilan du fardeau à supporter, mis à part dans quelques cas polaires (l'allocation immédiate par tête ou le grandfathering non-différencié généralisé à tous les pays ont des implications peu ambiguës). Avant de procéder à de telles analyses dans les chapitres suivants de ce rapport, il importe de préciser un autre élément source de difficultés dans la négociation : la multiplicité des critères pour évaluer l'ampleur (voire le signe) du fardeau futur.

	Head-rule	Variables observables	Formule	Paramètres	Transition
1	Grand-fathering	Émissions de référence	Taux de réduction uniforme	Année de référence + taux de réduction	Seuils ou taux différenciés.
2	Proposition brésilienne	Émissions historiques	Modèle climatique + réductions proportionnelles à la responsabilité	Amplitude de la comptabilité passée + paramètres du modèle + enveloppe	Aucune dans la proposition, seuils dans l'analyse RIVM.
3	Règle d'Agarwal	Population	Quotas proportionnels à la population	Niveau d'émissions par tête	Aucune
4	C&C	Émissions de référence et population	Convergence progressive vers un niveau uniforme d'émissions par tête	Année et niveau de convergence + année de référence.	Aucune
5	Multi-critères	Nombreuses possibilités : Émissions par tête, PIB par tête, intensité énergétique, croissance du PIB...	Somme pondérée de critères normalisés	Pondération des critères + paramètre d'échelle	Aucune
6	Menu	Emissions par unité de PIB, émissions par tête	Libre choix ou conditions.	Conditions de sélection des options.	Options spécifiques pour les PED.
7	Règle de Jacoby	Bien-être individuel, ou PIB par tête	Taux de réduction croissant avec la richesse par tête	4 paramètres interprétables.	Aucune
8	Proposition australienne	Courbes de coût marginal	Égalisation des coûts marginaux	Prix du carbone	Seuil nécessaire
9	Bottom-up	Description des économies nationales	Sous-règles sectorielles + Somme des réductions sectorielles	Paramètres des sous-règles, hypothèses futures.	Seuil et période d'ajustement.

### 3. DES CRITÈRES MULTIPLES ET PARFOIS CONTRADICTOIRES

La multiplicité des métriques disponibles pour que les négociateurs évaluent les implications des différentes propositions d'attribution des quotas n'est pas un pur artefact intellectuel. Il suffit de revenir aux négociations passées pour s'apercevoir que la position de chaque pays peut dépendre fortement du « proxy » retenu dans les débats publics internes pour juger de l'ampleur du fardeau, ouvrant la voie tantôt à des emplois stratégiques de telle ou telle métrique, tantôt à de purs malentendus.

#### 3.1. Différentes métriques pour mesurer les impacts des allocations de quotas

Sans être exhaustif, on peut citer au moins cinq métriques différentes toutes crédibles dans les argumentaires internes ou externes :

- prix international du carbone
- impact sur le prix de l'énergie
- variation de PIB
- variation de bien-être
- transferts internationaux

- **Le prix du carbone émanant de l'allocation des quotas** : cet indicateur n'est pas en soi représentatif du fardeau supporté par chaque pays, mais il a un rôle très important dans l'évaluation. Tout d'abord il ne dépend à priori, sur un marché concurrentiel, et en supposant que les coûts marginaux de réduction s'égalisent tous au prix de marché, que de l'enveloppe globale des quotas et de la composition des Parties se partageant les quotas de cette enveloppe<sup>4</sup>. Ensuite il a un impact fort sur les autres critères d'évaluation du fardeau supporté car d'une part il va conditionner l'ampleur des réductions qu'il est intéressant de réaliser en interne (jusqu'à égalisation des coûts marginaux) et d'autre part il va être le multiplicateur des transferts dus aux échanges de quotas sur le marché.

- **L'impact du prix international du carbone sur les prix nationaux de l'énergie** : le coût du respect de la contrainte d'émissions est transmis au système de prix domestiques, en fonction des instruments mis en œuvre en interne (système « relais » national de quotas échangeables, taxe sur les énergies fossiles, politiques et mesures sectorielles, etc.). L'impact global des mesures sur les prix à la consommation dépendra des systèmes productifs et fiscaux préexistants (par ex. de la part relative de l'hydraulique ou du charbon dans la production d'électricité). Par ailleurs – et il ne faut pas négliger ce point généralement occulté dans les modèles d'évaluation – l'effet du prix international du carbone sur les prix domestiques dans un pays donné dépendra du taux de parité de pouvoir d'achat applicable au pays concerné, qui peut être lui-même influencé par les variations de taux de change dus à un changement important des flux de capitaux et de marchandises internationaux, suite à une régulation internationale des émissions. L'économie politique de l'affaire climatique montre à quel point les contraintes d'acceptabilité d'une hausse des prix de l'énergie (et particulièrement des prix des carburants) imposée de façon délibérée par des politiques publiques (et non par un choc externe) ont pu constituer une véritable pierre d'achoppement que les négociateurs ont finalement essayé de contourner, par exemple en abandonnant l'idée de taxes carbone au profit de système de permis d'émissions négociables.

---

<sup>4</sup> Nous développerons ce point dans le second chapitre, en détaillant le fonctionnement « parfait » du marché de carbone.

- **Les effets en bien-être, une fois pris en compte les effets d'équilibre général**, et pas seulement sur les prix de l'énergie : ils dépendent aussi des conditions pré-existantes dans chacun des pays. Dans le cas d'une taxe, l'ampleur du double dividende obtenu sera fonction du mode de recyclage de son produit au sein de l'économie nationale. Dans le cas de quotas domestiques, le mode d'allocation des permis (gratuits ou aux enchères) aura un impact différencié en terme de signal-prix vers les consommateurs. Au bout de la chaîne, l'évaluation des variations de bien-être dépendra aussi du niveau de revenu du consommateur considéré, qui implique des variations de l'utilité marginale du revenu, généralement supposée décroissante<sup>5</sup>. De ce point de vue, il est intéressant de noter dans la majorité des analyses économiques demandées par les décideurs, l'absence de prise en compte de ce point clé de la théorie économique moderne : il est nécessaire, pour financer de façon efficace et équitable un bien public, de différencier la contribution marginale (ici le prix) en fonction inverse du niveau de revenu (prix de Lindhal) ou d'opérer en cas de prix unique de larges compensations.

- **Le coût total de respect de la contrainte carbone par les pays** : celui-ci couvre les coûts des réductions domestiques effectivement réalisées et l'achat (ou la vente) de quotas échangeables sur le marché international afin d'égaliser émissions effectives et quotas réellement possédés. L'évaluation du coût des réductions d'émissions réalisées est rendue complexe par la multiplicité des notions de coût (technique, sectoriel, macroéconomique) et des outils de modélisation utilisés.

- **Les contraintes exercées par les transferts en contrepartie des échanges de permis** : leur répartition et leur dimension posent des problèmes *macroéconomiques*. L'ampleur des déséquilibres dépendra aussi des gains d'efficacité fait dans le domaine énergétique et de la baisse conséquente de la dépendance énergétique. Le recyclage des flux de capitaux supplémentaires, susceptibles de dépasser les niveaux actuels d'investissements directs de l'étranger, au sein des économies dépendra des structures technico-économiques préexistantes (modes de productions intensifs ou non en capital), et pourra induire des déséquilibres importants de balance des paiements (McKibbin et Wilcoxon, 2002) ce qui ne manque pas de soulever des questions d'ordre *géopolitique*, notamment dans le cas d'une forte polarisation des transferts vers un ou deux pays (Russie, dotée d'« air chaud<sup>6</sup> » dans le protocole de Kyoto, ou Chine, qui pourrait recevoir la majorité des crédits du mécanisme de développement propre).

### 3.2. Une illustration de l'ampleur des tensions

Du fait de cette multiplicité de critères, une des tensions les plus frappantes et les plus susceptibles de se reproduire dans l'avenir est tout simplement la contradiction entre la vertu de minimisation du prix du carbone qui est attribuée au système de permis internationalement négociables et

---

<sup>5</sup> A cause de cet effet, additionnel au déséquilibre des taux de parités de pouvoir d'achat, un dollar prélevé sur une *tep* d'énergie carbonée aura des effets d'une ampleur radicalement différente sur un habitant de Bombay et sur un habitant de New York.

<sup>6</sup> Certains pays auront en effet un excès de droits d'émissions par rapport à leur année de référence. C'est le cas de l'ancienne URSS et des pays de l'Europe de l'Est. Le niveau de leurs émissions a décru entre 20 et 46% par rapport à l'année de référence. Ces pays auront un excès de quotas qu'ils pourront ainsi vendre sur le marché de permis. Après d'âpres négociations sur l'inclusion ou l'exclusion des échanges d'une partie de cet air « chaud », l'accord de Marrakech (2001) n'apporte aucune restriction sur l'échange de permis issus de celui-ci. Ce transfert de droit ne représente aucune réduction réelle par rapport au scénario de référence et les réductions d'émission correspondantes sont atteintes à un coût nul. Cette quantité d'air « chaud » ampute d'autant l'objectif de réduction global de -5,2% par rapport aux émissions de 1990 fixé par le Protocole de Kyoto.

le fait que cette minimisation se fait au prix de transferts internationaux importants. Historiquement, alors même que l'Union européenne soupçonnait les USA de vouloir éviter des efforts domestiques par une importation massive de crédits de carbone, une grande partie de l'opposition à Kyoto au sein même des USA, et même dans les rangs démocrates les plus ouverts aux politiques climatiques, venait de la crainte des impacts macro-économiques de transferts trop massifs, surtout dans un contexte de déficit structurel de la balance commerciale ; très schématiquement, les États-Unis se voyaient exposés à la nécessité d'importer à la fois leur énergie et le droit de l'utiliser, ou, pour éviter cette éventualité, de relever très fortement leurs prix internes de l'énergie, ceci aux risques de dégrader leur position sur le terrain de la compétitivité, et d'un fort impact sur les populations très fortement dépendantes de l'utilisation de l'automobile.

Afin d'illustrer notre propos, nous proposons ici un cas d'évaluation numérique d'un marché de quotas élargis aux PED, qui met clairement en évidence les larges différences d'appréciation possibles sur une même allocation de quotas selon la variable sur laquelle l'évaluation porte. Cet exercice de quantification est réalisé à partir du modèle Imacim-S, calibré sur les données issues de simulations du modèle Poles de l'Institut d'Economie et de Politique de l'Energie. Ces simulations permettent d'évaluer les résultats nets en 2030 de deux règles contrastées d'attribution des quotas, définies lors d'exercices antérieurs avec IMACLIM-POLES. Ces deux règles sont :

- Une allocation respectant le critère normatif de convergence des émissions par tête à moyen terme (2050). Dans ce scénario, il se trouve que, en dehors de la Chine, les émissions des pays en développement ne sont pas contraintes en 2030. La Chine quant à elle en raison de la rapidité de sa croissance dans le scénario de référence doit, dès cette date, réduire ces émissions de 26 % par rapport aux tendances en cours. Les pays industrialisés doivent eux réduire leurs émissions de 20% en 2030. A l'inverse, des régions comme l'Inde, l'Afrique Subsaharienne, les « autres » pays asiatiques ou dans une moindre mesure le Brésil, reçoivent un excès de quotas, et bénéficient donc, de transferts importants.

- Une règle « soft landing », prévoyant un élargissement sur la base de l'architecture du Protocole de Kyoto avec une entrée progressive des PED selon leur niveau de revenu (réductions de 20% en 2030 pour les pays industrialisés, entrée dans le système en 2015 pour les pays émergents et en 2045 pour les pays les moins avancés). Cette règle impose une contrainte effective sur les émissions dès l'entrée des pays dans le système, contrainte qui sera d'autant plus importante que les pays connaissent des forts taux de croissance du PIB entre 2000 et 2030, et qu'ils partent d'un niveau d'émission par tête relativement bas.

Les deux règles sont construites de manière à allouer un même montant total d'émissions, en 2030, environ de 10 GtC, ce qui conduit en cas de marché international généralisé et 'sans friction' à un prix du carbone de 43\$.

Le Tableau 2 fait nettement apparaître l'ampleur des contradictions du système. En termes de bien-être tout d'abord, si on adopte, comme dans la plupart des modèles de croissance une fonction d'utilité logarithmique, il apparaît que l'impact sur le bien-être d'un prix du carbone de \$43 en Inde est équivalent à la perte de bien-être d'un prix de \$391 dans les conditions américaines, et de \$1006 en Afrique subsaharienne. En d'autres termes, augmenter de \$43 le prix de l'énergie en Afrique représente pour le consommateur « moyen » un choc équivalent à une augmentation de \$1000 aux États-Unis. Ce prix doit de plus être ajusté selon le niveau des parités de pouvoir d'achat. Ceci pose des problèmes d'acceptabilité évidente pour la population et aurait probablement des conséquences récessives non maîtrisables en

matière de distribution des revenus et de satisfaction des besoins de base, donc de stabilité du développement.

En termes de transferts maintenant, la règle de convergence conduit à des flux en direction des pays en développement de l'ordre de 55 millions de dollars, soit un doublement des investissements directs à l'étranger actuels. Si on tient compte du fait que la taille des économies en développement aura doublé d'ici 2030, et si on fait l'hypothèse que le flux des investissements directs étrangers (27,5 milliards de dollars aujourd'hui (banque mondiale 2000) s'ajustera de façon proportionnelle, cela revient, en 2030, à des transferts équivalents à la totalité de l'IDE de cette période.

	Règle de convergence				Règle « soft landing »			
	RE	MC	$\Delta C$	T	RE	MC	$\Delta C$	T
Union européenne (15)	42 %	43(56)	-0,31 %	12,2	29 %	43(56)	-0,21 %	6,5
États-Unis	63 %	43(43)	-0,94 %	33,6	41 %	43(43)	-0,66 %	15,2
Japon	39 %	43(52)	-0,62 %	4,7	22 %	43(52)	-0,54 %	2,2
Canada, Océanie	59 %	43(60)	-0,68 %	5,9	43 %	43(60)	-0,47 %	3,7
Suisse, Turquie, Norvège	30 %	43(82)	+0,25 %	1,0	26 %	43(82)	+0,28 %	0,7
Europe de l'Est	29 %	43(125)	-2,28 %	1,6	8 %	43(125)	-1,46 %	-0,9
Ex-URSS	38 %	43(163)	-2,45 %	5,8	3 %	43(163)	+1,71 %	-6,9
Chine	26 %	43(189)	-1,57 %	-4,2	11 %	43(189)	-1,18 %	-18,9
Inde	-14 %	43(391)	-2,16 %	-22,2	16 %	43(391)	-3,03 %	-7,0
Brésil	-3 %	43(163)	-0,12 %	-1,1	20 %	43(163)	-0,36 %	1,0
Moyen-Orient & Afrique du Nord	19 %	43(168)	+0,05 %	2,0	6 %	43(168)	+1,36 %	-1,4
Afrique subsaharienne	-78 %	43(1006)	+3,95 %	-21,0	12 %	43(1006)	+0,22 %	0,6
Asie (autres)	-4 %	43(202)	-0,77 %	-15,3	32 %	43(202)	-1,15 %	5,0
Amérique Latine (autres)	-7 %	43(151)	+0,28 %	-2,8	9 %	43(151)	+0,05 %	0,3

**Tableau 2 : évaluation des coûts régionaux selon différentes métriques**

Source : Gherzi et al, (2003)

Notes : RE : réductions d'émissions par rapport à la *baseline* en 2030 ; MC : coût marginal de réduction, 1990 USD par tonne de carbone ; les chiffres entre parenthèses donnent le coût marginal ajusté selon le

niveau de revenu du pays ;  $\Delta C$  : variation de la consommation finale de biens non énergie ; T : transferts en milliards de dollars 1990 – les transferts se font de (positif) vers (négatif).

Mais le paradoxe le plus important contenu dans le tableau ci-dessus est celui des contradictions entre de supposés gains à l'échange et la réalité des impacts en équilibre général de politiques et mesures permettant ces échanges. Dans les simulations, on suppose que les échanges internationaux de quotas s'effectuent sans contraintes et, si l'Inde, le Brésil et les autres pays asiatiques maximisent leurs revenus, cela signifie que les consommateurs de ces pays verront augmenter leur facture énergétique individuelle de \$43 par tonne, par report pur et simple du coût marginal de réduction des émissions. Comme on l'a vu, l'impact en bien-être sera très important et ne sera pas compensé par la redistribution de la rente empêchée par le pays exportateur de permis.

Ceci se retrouve avec la règle de « soft landing » dans une moindre mesure puisque, les réductions étant partagées entre presque tous les pays, PI et PED, les montants de transferts sont moins importants, néanmoins, là encore, les gains des transferts ne compensent pas les pertes de consommation. Certes, les choses changent si les permis sont vendus aux enchères, les prix de carbone ajustés sont, bien sûr, encore plus importants, ainsi que les transferts, mais le revenu de ces ventes peut être recyclé au sein de politiques et mesures fiscales au niveau national, notamment dans les économies éloignées de leur frontière de production, ce qui permet des gains d'efficacité des systèmes de production. Le revenu des exportations de crédits carbone qui est censé être recyclé en gains de productivité des investissements ne pourrait être suffisant pour contrebalancer les pertes de pouvoir d'achat. L'impact net sur la consommation dépend du climat d'investissement dans le scénario de référence. Le coût privé du prix du carbone est alors compensé par les politiques mises en oeuvre pour recycler efficacement les revenus d'importation de façon à maximiser le bien-être social. Mais, ceci renvoie à une question importante de politique économique, dont il faudra tenir compte, on y reviendra, dans l'organisation finale du régime climatique, à savoir que les états doivent conserver la maîtrise des échanges et ne sauraient les déléguer totalement aux agents privés. Ils doivent en effet pouvoir maîtriser les effets redistributifs d'une hausse des prix de l'énergie et organiser au mieux le recyclage des revenus de transferts.

C'est pourquoi, tenant compte de la capacité de manipulation de controverses scientifiques et éthiques dans un processus de négociation porté par une machinerie si complexe, on ne pourra sortir de cette contradiction que si on renonce à fonder complètement les règles d'allocation de quotas sur des principes explicites d'équité (Ashton et Wang, 2003). Cela ne signifie pas qu'un accord sur un attracteur de long terme autour duquel organiser la discussion ne puisse être utile. Dans le contexte actuel, cet attracteur ne peut pas ne pas incorporer une certaine idée de convergence. Mais, une chose est de l'utiliser, comme dans l'approche « triptyque » pour la répartition des quotas au sein de la bulle européenne avant Kyoto, pour établir une base à partir de laquelle engager les discussions sur un « *package deal* » fait de quotas et de mesures d'accompagnement, de façon à déboucher sur un compromis jugé comme « équitable » par les Parties ; une autre est de prétendre fonder l'accord final sur des principes d'équité préétablis de façon trop rigide et non adaptative.



## CHAPITRE 2

### RÈGLES D'ALLOCATION EX ANTE ET FACTURE CLIMATIQUE EX POST : ÉVALUATION DES RÈGLES EN UNIVERS INCERTAIN

---

Afin de comprendre les implications réelles de ces différentes règles, et de dépasser les *a priori* communs qui guident les prises de parti pour telle ou telle d'entre elles, il est nécessaire d'entreprendre des simulations numériques des allocations correspondantes, du marché de permis et des coûts nets de la coordination climatique. Pour cela nous avons utilisé un outil de simulation d'un équilibre partiel du marché de quotas, décrit en détail dans la première partie de ce chapitre. A partir de données regroupant à la fois des scénarios – population, croissance économique, émissions de gaz à effet de serre – et des évaluations des coûts des réductions d'émissions, nous évaluons comment l'incertitude portant sur l'état du monde futur se répercute, en appliquant différentes règles d'allocation présentées au premier chapitre, sur le prix du carbone, les transferts internationaux dus aux échanges de quotas et les coûts totaux d'observance du régime climatique.

#### 1. UN OUTIL D'ANALYSE DU FONCTIONNEMENT DU MARCHÉ DE QUOTAS

Le premier niveau d'analyse des règles d'allocation de quotas est d'examiner les « dotations » initiales en permis d'émissions. Cette option est assez directe, et au-delà du strict examen quantitatif des quotas, son principal intérêt est d'illustrer l'impact de l'incertitude sur les scénarios futurs. Elle nécessite uniquement des informations sur ces scénarios pour en dériver les indicateurs pertinents dans les formules des règles (excepté pour des propositions plus complexes comme le calcul des responsabilités passées, dans la proposition brésilienne à l'AGBM). Elle permet d'analyser les règles en termes de répartition des nouveaux droits sur l'atmosphère, créés par le système des quotas. De plus, il ne faut pas oublier que c'est bien le seul résultat opposable dont disposent les négociateurs, les autres requérant l'utilisation d'un appareillage de modélisation plus complexe.

Le second niveau d'analyse est celui de la répartition des quotas ex post, après fonctionnement du marché des permis. Le mécanisme d'échange des quotas sur un marché est susceptible de modifier plusieurs points :

- Il fait émerger un prix du carbone, et crée ainsi de la richesse, simplement en transformant les quotas en une ressource rare commerciale. Il assure donc une rente aux pays qui disposent de suppléments de quotas par rapport à leur émissions de référence, ou de possibilités de réduction à coût très faibles (inférieur au prix du carbone). Notons que ce prix ne dépend, dans un marché parfaitement concurrentiel, que du volume total d'émissions ; mais des possibles formations de monopole ou d'oligopole peuvent être envisagées selon les règles d'allocation initiale, et cela modifie le prix du marché, donc les rentes et les coûts nets (Ellerman et al., 1998).
- Il peut modifier complètement la répartition géographique des permis, et remettre en question des concepts d'équité tels que les droits individuels à émettre [Godard, 1999], vidant la règle d'allocation de son sens et de sa justification *ex post*.
- Théoriquement, il améliore le sort de tous : les acheteurs de permis évitent des réductions à coût plus élevé que le prix du marché, tandis que les vendeurs valorisent les permis excédentaires et/ou une partie de leur réductions domestiques à bas coût. Mesurés en variation de bien-être, les changements induits par le marché semblent aussi positifs pour tous, mais [Reilly, 2002]

mentionne des simulations de cas de pertes nettes de bien-être à cause du marché pour certains pays, dus aux distorsions pré-existantes sur les marchés internes. On ne peut donc pas en juger sans tenir compte de tous les effets d'équilibre général (*spillover effects*).

Dans notre analyse, nous supposerons un marché parfait du carbone, simulé en équilibre partiel, ce qui exclut de saisir les effets de capture de la rente par un petit groupe de vendeurs ou les effets d'équilibre général. Nous nous concentrons sur l'évaluation de l'état de ce marché sur les neuf périodes d'engagement suivant Kyoto, de 2012 à 2052.

## 1.1. Description du modèle

Nous utilisons un modèle d'équilibre partiel du marché de carbone, dont l'architecture est empruntée à [Lecocq, 2000], qui s'est inspiré lui-même des travaux de [Rose et al., 1998] et [Burniaux, 1998]. Ce modèle simule un marché mondial de permis et des niveaux d'abattement régionaux pour des périodes successives, et calcule les transferts financiers et les coûts nets régionaux des politiques climatiques, à partir d'une règle d'allocation des quotas donnée. Le temps est découpé en périodes de 5 ans, représentées chacune par une année médiane (par exemple 2010 pour 2008-2012). Le monde est représenté par  $r$  régions. Chaque région est décrite, dans un scénario de référence futur, par sa population  $Pop(r,t)$ , son produit régional brut  $GDP(r,t)$  et ses émissions de CO<sub>2</sub> de référence  $E_{ref}(r,t)$ . Le modèle effectue, pour chaque scénario futur, à chaque période, itérativement, les opérations suivantes :

- Sélection des participants

Certaines règles s'appliquent directement à toutes les régions dès la seconde période (2012-2017) d'engagements, tandis que d'autres contiennent un seuil d'entrée, le plus souvent fondé sur la capacité de payer, et donc sur le niveau de revenu par habitant. Lorsque cela est nécessaire, l'indicateur pertinent à comparer au seuil de participation est calculé en fonction des données du scénario qui sert de référence, et valables pour la période précédente <sup>7</sup>, comparé à la valeur du seuil (soit statique soit dynamique, donc à calculer aussi).

- Allocation initiale des quotas

Les régions ne participant pas au marché ne joueront aucun rôle dans l'équilibre de marché : soumises à aucune contrainte d'émissions, elles suivront le sentier d'émissions régional inclus dans le scénario lui-même<sup>8</sup>. De leur côté les régions participantes recevront une allocation de quotas  $Qa(r,t)$  donnée par la règle concernée, via une formule prenant en compte, dans le cas le plus général, les quotas de la période précédente, des variables endogènes (comme le PNB modifié par la boucle de rétroaction économique, cf. [Lecocq, 2000]) et des paramètres exogènes comme la population de référence :

$$Qa(r, t) = f(Qa(r, t-1), \text{variables endogènes}, \text{paramètres exogènes})$$

---

<sup>7</sup> Nous partons du principe qu'il est indispensable que les variables utilisés pour les seuils de participation soient mesurables en temps voulu, ce qui explique pourquoi on est contraint de ne prendre que les valeurs passées les plus proches. Nous supposons aussi qu'il n'y a pas de comportement d'attentisme stratégique pour les futures régions entrantes, qui consisterait à laisser la référence croître au maximum jusqu'à l'entrée dans le régime contraignant, de manière à maximiser les quotas attribués ensuite.

<sup>8</sup> Cela signifie que nous ne prenons pas en compte l'effet de mécanismes de type MDP dans notre modèle.

- Simulation du marché de permis

Premièrement nous faisons l'hypothèse d'un marché parfaitement concurrentiel, en modélisant toutes les régions comme « price-takers » sans pouvoir de marché particulier. Autrement dit nous négligeons l'éventualité d'une manipulation des quantités d'offre ou de demande tels que celle couramment évoquée pour « l'air chaud » russe ou ukrainien.

Deuxièmement, nous supposons que tous les quotas peuvent être mis sur le marché, avec pour seule limite la quantité totale de quotas alloués. Cette hypothèse revient à négliger la condition de complémentarité actuellement présente dans le protocole de Kyoto.

Troisièmement, il n'y a ni *banking* ni *borrowing*<sup>9</sup> dans cette version du modèle. Nous supposons que toutes les Parties sont en pleine observance à chaque période.

Dans le modèle, chaque région participant au marché se trouve devant un arbitrage entre abattement domestique  $a(r,t)$  et acquisition de permis sur le marché  $Qp(r,t)$  au prix d'équilibre du marché  $p_c(t)$ . Pour effectuer cet arbitrage, chaque région possède une courbe de coût marginal d'abattement agrégée  $MAC(a)$ . La minimisation du coût total pour chaque région consiste alors à suivre le programme suivant :

$$\text{Min}_{a(t)} \left( \int_0^{a(t)} MAC(\alpha) d\alpha + p_c \cdot Qp(r,t) \right)$$

avec  $E_{ref}(r,t) \cdot (1 - a(t)) = Qa(r,t) + Qp(r,t)$

Les conditions de premier ordre de cette optimisation correspondent à l'égalisation du prix des permis sur le marché et des coûts marginaux d'abattement dans toutes les régions participantes :

$$\forall t, \forall r,$$

$$MAC(a(r,t)) = p_c(t)$$

Ces conditions de premier ordre et l'équation de complétude du marché permettent d'évaluer le niveau d'abattement de chaque région et le prix final du marché. On dérive aussi le niveau réel d'émissions de chaque région  $E(r,t)$ .

- Calcul des transferts financiers et des coûts nets.

Le bilan financier se compose d'une part des coûts totaux d'abattement  $C_{tot}(r,t)$ , d'autre part des transferts de fonds dus aux acquisitions/ventes de permis  $T_{sf}(r,t)$ . Les premiers sont évalués en intégrant la courbe de coût marginal jusqu'au niveau d'abattement déterminé auparavant, tandis que les seconds sont simplement obtenus en multipliant le volume algébrique de permis échangés par le prix d'équilibre.

## 1.2. Données utilisées

L'architecture du modèle est assez simple, la complexité de l'exercice réside dans les données requises pour effectuer nos simulations. Le modèle décrit ci-dessus nécessite en effet deux types de données :

---

<sup>9</sup> Alors que le « borrowing » est en quelque sorte autorisé par le protocole de Kyoto, via la pénalité de 30% de majoration des réductions non réalisées en première période pour la période suivante (cf. Hourcade et Gherzi, 2000).

- des scénarios futurs, donnant l'évolution des populations, de la croissance économique et des émissions de CO<sub>2</sub> pour toutes les périodes considérées ;
- des courbes de coût marginal d'abattement pour chaque région et chaque période.

Nous effectuons nos simulations à une échelle mondiale en représentant un monde en 12 régions, dont six font partie actuellement de l'Annexe B

USA : Etats-Unis d'Amérique	CPA : Pays d'Asie à planification centrale (dont Chine)
CANZ : Canada et Océanie	SAS : Asie du Sud (dont Inde)
WEU : Europe de l'Ouest	ROA : Reste de l'Asie
EEU : Europe de l'Est	MENA : Moyen-Orient et Afrique du Nord
FSU : Pays de l'ex-URSS	SAFR : Afrique sub-saharienne
JPN : Japon	LAM : Amérique Centrale et Latine

Tableau 3.1. Régionalisation du monde dans le modèle BUSH 21 (BURden SHaring 21<sup>st</sup> century)

Nous raisonnons sur des périodes de 5 ans, correspondant aux « rounds » successifs des négociations internationales, en commençant par la période 2007-2012. Chaque période est représentée par une année qui se situe au milieu de la période ; pour des raisons de cohérence avec les scénarios économiques futurs existants, il s'agira des années allant de cinq en cinq à partir de 2010, allant jusqu'à 2050.

La complexité des données utilisées provient des incertitudes considérables qui pèsent sur le développement démographique et économique futur des pays, l'organisation du monde, les systèmes énergétiques et technologiques, la pénétration du progrès technique, l'influence du climat sur l'économie, etc. Les scénarios non-probabilisables dessinés par les équipes de modélisation, avec l'appui d'expertises technologiques, économiques et démographiques, fournissent des images très variées du futur, couvrant une amplitude considérable : par exemple les scénarios extrêmes d'émissions mondiales à 2100 vont de 4 gigatonnes à 20 gigatonnes de carbone<sup>10</sup>. Dans cette situation, le recours aux scénarios comme évolutions équiprobables, ou visions crédibles du futur, est indispensable, vu l'impossibilité de trancher, même pour un scénario médian, qui n'aurait pas plus de probabilité d'occurrence et de sens qu'un autre.

Une seconde source de complexité provient de l'utilisation de données simulées par d'autres modèles. Les scénarios ont été sélectionnés de façon à assurer la cohérence des données de population, de PIB et d'émissions. Mais le recours aux courbes de coûts marginaux d'abattement sollicite en général d'autres exercices de modélisation. La notion de coût étant polysémique en économie, différentes simulations recouvrent souvent différentes composantes des coûts des politiques climatiques. A l'incertitude qui entoure ces coûts encore non expérimentés, s'ajoutent donc des difficultés d'identification et de tri des coûts pertinents à prendre en compte pour arbitrer entre abattement domestique et échange de permis d'émissions. Enfin ces courbes ne concernent qu'une période de temps, et notre exercice de simulation s'étale sur 9 périodes : l'extrapolation des coûts aux périodes suivantes, la dépendance des coûts futurs en fonction des abattements présents, l'interprétation des courbes à ce niveau d'agrégation sont autant de questions à la fois théoriques et méthodologiques qui émergent, et que nous détaillons en annexe de ce rapport.

<sup>10</sup> Données détaillées dans la partie suivante, couvrant tous les scénarios étudiés, excepté le scénario IS92e, jugé trop extrême.

### 1.2.1. Scénarios futurs

Les incertitudes sur le comportement futur des systèmes socio-économiques nous obligent à raisonner en termes de scénarios et non de prévisions (IPCC, SRES report, 1999). Ces scénarios sont des images possibles du futur, assises sur des hypothèses crédibles explicites et produites par l'utilisation cohérente de différents modèles économiques, démographiques et techniques. Ils ne sont pas accompagnés d'une certaine probabilité d'occurrence ou d'un indice de confiance. Ils sont tous à prendre comme des éventualités plausibles et des outils de compréhension des conséquences futures potentielles des mécanismes mis en jeu à partir d'aujourd'hui ([Berkhout et al., 2002]). L'intervalle parcouru par un jeu de scénarios nous permet ici de représenter l'étendue des incertitudes sur les perspectives futures<sup>11</sup>.

A partir de la base de données originale de 562 scénarios divers et variés de l'IPCC<sup>12</sup>, nous avons sélectionné les scénarios mondiaux comportant plus de 5 régions et allant au moins jusqu'en 2050. Cela restreint le champ d'investigations à 44 scénarios venant de 18 sources différentes. En sélectionnant ceux qui comportaient des trajectoires pour la population, la croissance économique et les émissions de CO<sub>2</sub>, nous avons finalement obtenu 23 scénarios venant de 4 sources différentes :

- les scénarios IIASA-WEC, nommés A1, A2, A3, B, C1 et C2 <sup>13</sup>;
- les scénarios IMAGE nommés A1, A2, B1, B2 (nomenclature SRES 2001) ;
- les scénarios EPA 98, numérotés de 1 à 7 ;
- les scénarios IS92 (SRES 1992), numérotés de a à f.

Nous effectuons une rapide présentation de ces quatre familles de scénarios et présentons une synthèse graphique du panel de scénarios utilisés.

#### **Scénarios IIASA-WEC.**

En partenariat, l'IIASA (International Institute for Applied Systems Analysis, ONG autrichienne) et le WEC (World Energy Council, association mondiale regroupant producteurs d'énergie, agences gouvernementales, ONG, ministères, etc.) ont publié, à la suite de huit années de recherche et de consultations d'experts régionaux, un jeu de six scénarios régionalisés. Ces scénarios se focalisent sur la période 2000-2050, mais comportent une indication de tendance quantifiée pour 2100. Ils sont tous fondés sur une unique évolution future de la population (10.1 milliards en 2050), les critères de différenciation concernant principalement le domaine énergétique.

Les scénarios A1, A2 et A3 représentent une croissance futur élevée, accompagnée de progrès technique et d'amélioration de l'efficacité énergétique importants (0.9 % par an). Les trois scénarios divergent sur la répartition des énergies primaires : A1 repose principalement sur le pétrole et le gaz, disponibles en grande quantité, A2 sur un retour massif au charbon bon marché, A3 sur un boom technologique du nucléaire et des énergies renouvelables et l'abandon des fuels fossiles. Ces divergences n'apparaissent qu'au-delà de 2020 du fait de la longue durée de vie du capital dans le domaine de l'énergie.

Le scénario B décrit un futur plus modéré, dans lequel la croissance et le progrès technologique sont moins élevés, mais où les barrières douanières disparaissent et le développement du Sud se fait, mais

---

<sup>11</sup> Bien que l'IPCC, à propos de ses scénarios IS98, reconnaisse ne pas couvrir les hypothèses extrêmes sur les hypothèses sous-jacentes, dans [IPCC, SRES report, 1999], paragraphe 4.6.

<sup>12</sup> disponible sur le site <http://www-cger.nies.go.jp/cger-e/db/ipcc.html> en format Microsoft Access.

<sup>13</sup> les scénarios C1 et C2 ont parfois été écartés des simulations parce qu'ils comprennent déjà des politiques de décarbonisation.

à un rythme modéré. Globalement les énergies renouvelables et le nucléaire prennent plus d'ampleur, au détriment des énergies fossiles.

Les scénarios C1 et C2 représentent des cas de politiques environnementales volontaristes. Ils ne sont donc pas *business as usual* et ne seront pas intégrés dans nos simulations.

### **Scénarios IS92.**

Le jeu de scénarios publié par le GIEC en 1992 sert de référence pour de nombreux exercices de simulation, car il couvre un intervalle très large de futurs possibles. Bien que réactualisé en 1996, il conserve tout son intérêt pour l'étude de l'incertitude sur l'avenir. Compilés avec le modèle ASF dans un partenariat entre l'EPA et le cabinet ICF, ces six scénarios sont organisés de la manière suivante :

- IS92a est un scénario moyen (dans le sens de la *médiane* et non de la moyenne arithmétique) qui suppose une croissance moyenne de la population (11.3 milliards en 2100) et une croissance économique moyenne. Les autres scénarios sont en quelque sorte construits autour de celui-ci.
- IS92b reprend les spécifications du précédent mais avec une prise en compte de l'environnement plus importante. Il est considéré comme une limite inférieure des scénarios BAU en termes d'émissions de GES.
- IS92c suppose une croissance de la population et de l'économie faibles (6.4 milliards d'habitants en 2100, comparable à A1 dans les IS98).
- IS92d modifie le précédent avec une croissance économique plus élevée (2% par an au lieu de 1.2 %)
- IS92e est un scénario extrême en termes d'émissions, du fait d'une croissance très élevée de l'économie (3% par an) et d'hypothèses minimales sur le progrès environnemental.
- Enfin IS92f suppose une croissance très importante de la population (17.6 milliards en 2100), mais l'hypothèse de croissance limitée, identique à celle de IS92a, limite la croissance des émissions.

### **Scénarios IS98 produits par IMAGE.**

A la demande du SRES (Special Report on Emissions scenarios) en 1996, des nouveaux jeux de scénarios ont été réalisés par de nombreuses équipes de modélisation, pour réactualiser les informations ayant servi de base aux IS92, améliorer les méthodes de modélisation et la cohérence des scénarios. Le résultat final est constitué de quatre familles de scénarios avec un scénario marqueur pour chaque famille. Nous considérons ici les scénarios créés par l'équipe d'*IMAGE*, car, même s'ils ne sont pas scénarios marqueurs, ils présentent un degré de désagrégation très intéressant.

La famille A1 est caractérisée par une population stabilisée en 2050 à 9 milliards d'êtres humains, une croissance et un progrès technique élevée, ainsi qu'une globalisation totale. La préoccupation environnementale est faible, tandis que la production matérielle (i.e. industrielle et agricole) est élevée, fondée sur une efficacité fortement croissante. On distingue trois scénarios selon les orientations prises par l'approvisionnement en énergie primaire : A1f repose sur une consommation intensive d'énergies fossiles, A1t consacre à l'opposé une dominance d'énergies non-fossiles, tandis que A1b représente un équilibre médian.

La famille B1 comporte la même stabilisation de population, et aussi une forte croissance, mais fondée beaucoup plus sur les services, et accompagnée de préoccupations environnementales plus

importantes (interventions gouvernementales incitations pour les fuels propres). La globalisation y est aussi plus encadrée, et les inégalités de développement sont réduites.

La famille A2 repose sur un développement très régionalisé, une fragmentation du monde, une croissance plus faible et une population plus élevée (croissante jusqu'à 13.5 milliards en 2100). Le charbon revient en force dans de nombreuses régions du fait de son bas coût d'extraction. Le progrès technique et la croissance de l'efficacité énergétique sont faibles.

La famille B2 est plus optimiste que la précédente sur la prise en compte de l'équité et de l'environnement. Elle repose aussi sur une croissance plus hétérogène, un monde très régionalisé, une population moins maîtrisée que pour les familles A1 et A2. Cette famille incarne un développement durable sur un canevas régional.

### **Scénarios EPA 98.**

Les scénarios EPA 98 font partie des scénarios engendrés pour la création des IS98. Ils ont été compilés par une équipe d'ICF sur le modèle ASF, la totalité des hypothèses et une analyse des résultats est disponible dans [Pepper et al., 1998]. Les cinq premiers scénarios reposent sur des hypothèses variées de croissance de la population, de l'économie et du progrès technique, tandis que EPA6 et EPA7 sont des études de la sensibilité des émissions totales au rythme de croissance des pays de l'OCDE.

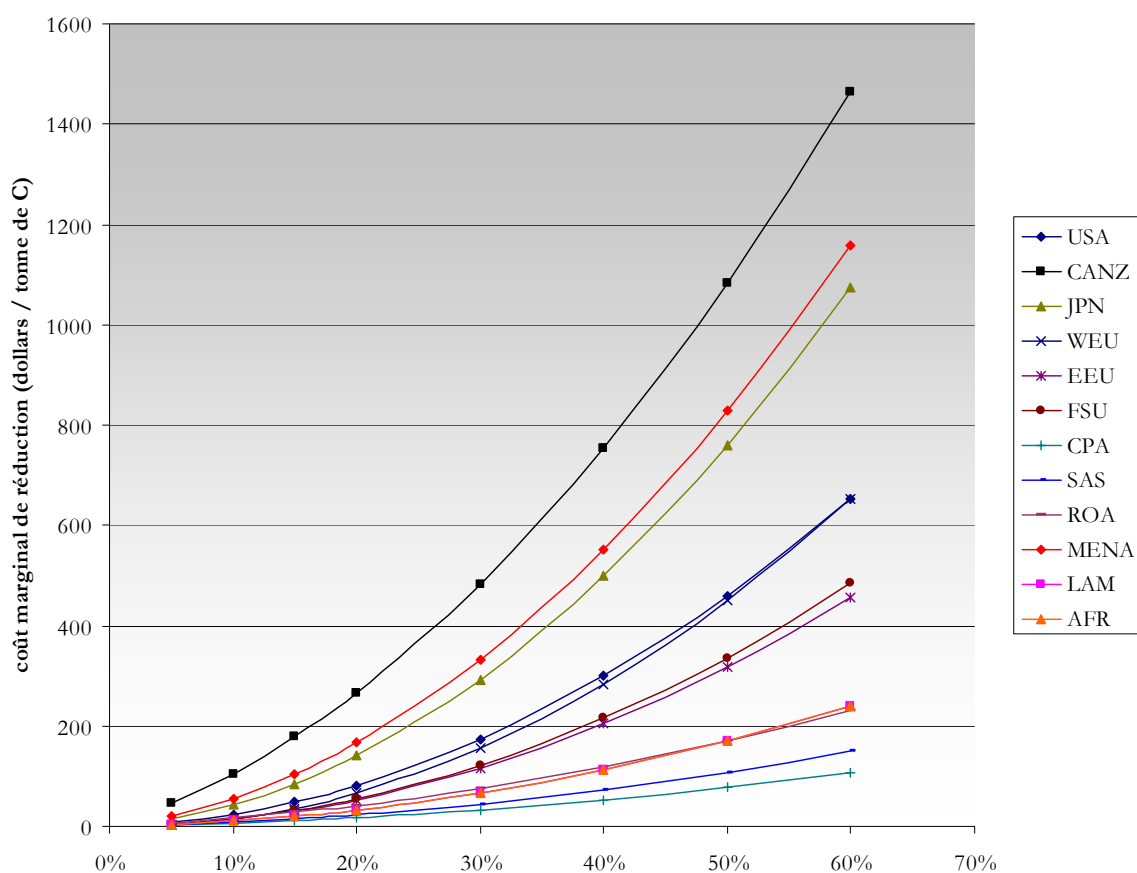
- EPA1 s'apparente au cas IS92a, représentant un scénario modéré, fondés sur des hypothèses moyennes à tous points de vue (population de 9.5 milliards en 2050).
- EPA2 incarne une globalisation de l'économie mondiale appuyée sur un progrès technologique élevé, et une forte amélioration de l'efficacité énergétique ainsi que des technologies des énergies renouvelables.
- EPA3 reprend EPA2 avec des hypothèses de progrès technique plus faibles et une croissance plus faible de l'OCDE.
- EPA4 est fondée sur une économie régionalisée, mais quand même dotée d'un potentiel technologique élevé. Les barrières commerciales restent élevées, donc le progrès technologique élevé se diffuse mal.
- EPA5 reprend EPA4 avec un progrès technique faible.
- EPA 6 s'écarte de EPA1 par un progrès technique et une croissance faible.
- EPA7 s'écarte de EPA1 par un progrès technique et une croissance élevée.

#### *1.2.2. Coûts de réductions des émissions*

L'obtention d'informations sur les coûts futurs d'abattement des émissions dans les différentes régions et pour différentes périodes présente des difficultés théoriques et pratiques très sérieuses. Premièrement, la définition et la nature des coûts de réduction peuvent être envisagées sous des angles différents, de même que les procédures d'évaluation de ces coûts, qui fournissent des chiffres différents mais tous porteurs de sens. Deuxièmement, la construction de courbes de coût marginal d'abattement, très utiles dans les exercices de modélisation, est complexe, du fait qu'elle synthétise une quantité considérable d'informations techniques et économiques ; leur interprétation et leur manipulation est sujette à la même complexité. Troisièmement, l'utilisation de ces courbes hors de leur modèle d'origine et sur plusieurs périodes reste problématique. Nous sommes de fait confrontés à ces difficultés puisque les courbes de coût marginal sont au cœur des simulations du marché de carbone et constituent des données « clés » pour

notre analyse. Pour ne pas alourdir l'analyse effectuée dans ce chapitre nous avons reporté en annexe les principaux problèmes rencontrés et nos choix méthodologiques.

Il existe peu de jeux publiés de courbes de coût marginal d'abattement, a fortiori si on se limite à ceux qui dont l'agrégation géographique est à peu près similaire à la notre. Nous nous sommes basés sur un jeu calculé par le modèle d'équilibre général EPPA, dont les chiffres sont fournis dans (Ellerman et al., 1998). Nous avons cependant eu quelques opérations à effectuer sur les données initiales, à savoir (i) une traduction des courbes d'un abattement donné en volume vers un abattement en pourcentage, en utilisant la référence donnée par la même source que les courbes ; (ii) une extrapolation de ces courbes en pourcentage pour les régions de notre modèle proches des 12 régions EPPA<sup>14</sup>. La Figure 3 reprend les courbes obtenues en pourcentage pour nos 12 régions.



**Figure 3 : courbes de coût marginal de réduction**

NB : La transposition des courbes initiales d'EPPA exprimées en tonnes de CO<sub>2</sub> en un nouveau jeu de courbes exprimées en % de réduction des émissions par rapport à la référence permet de prendre partiellement en compte le lien de dépendance entre les courbes de coûts et le scénario de référence

<sup>14</sup> La courbe donnée pour le Brésil étant particulièrement pentue, alors que les évaluations portant sur ce pays fournissent des coûts très faibles (cf. [IPCC, WG III, 2001c]), nous avons donc préféré attribuer la même courbe aux régions LAM et SAFR en extrapolant celle de la région ROW d'EPPA.



considéré. Avec cette méthode nous ne couvrons pas les différences dans les changements structurels sous-jacents aux différents scénarios, mais seulement un effet de taille de l'économie, à structure identique.

## 2. FAITS STYLISÉS SUR LE COMPORTEMENT DES RÈGLES D'ALLOCATION DE QUOTAS

La construction d'un outil de modélisation tractable et l'obtention de données harmonisées nous permettent de procéder à une multitude de simulations, dont le contenu semble particulièrement riche. Un système de quotas comporte *de facto* une incertitude sur les coûts, et une difficulté à établir le lien entre l'objet formel de la négociation – les quantités attribuées – et l'objet réel de la négociation – les coûts. La première conséquence de cet écart est que la perception *a priori* des règles et de leurs conséquences financières est parfois mise en défaut par les simulations que nous avons réalisées. Il est donc effectivement nécessaire d'avoir une meilleure compréhension des mécanismes des règles d'allocation sur le court-terme et le long-terme. Dans cette perspective les simulations et les tests de sensibilité aux paramètres révèlent le fonctionnement des règles et éclairent ou infirment certaines intuitions. Nous procédons dans cette partie à une présentation des traits principaux de chaque règle testée, ainsi que des tests de sensibilité à leurs paramètres. Les cinq règles testées sont les suivantes :

- deux règles considérées comme *polaires* dans le débat sur le schéma d'allocation : la règle de *grand-fathering* et celle d'*allocation par tête* proposée par Agarwal.
- la règle de *Contraction et Convergence* du Global Commons Institute, censée intégrer les deux précédentes pour trancher le débat entre ces deux extrêmes.
- deux règles de différenciation des taux de réduction : la *règle de Jacoby*, et la règle *multicritère* décrite dans la proposition norvégienne.

Nous avons choisi pour tester la sensibilité de ces règles un unique scénario : le scénario A1 de l'IIASA-WEC. Celui-ci suppose une croissance assez forte, mais est relativement médian en ce qui concerne les émissions. L'ensemble des résultats de cette partie est relatif à ce scénario.

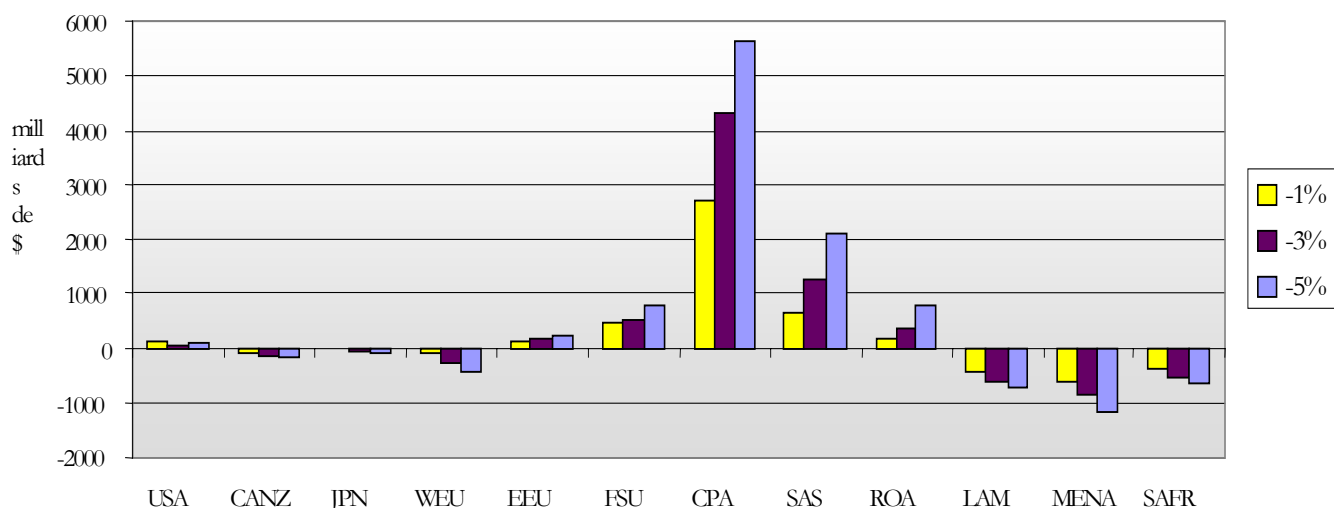
### 2.1. Grand-fathering.

Comme nous l'avons rappelé au chapitre 1, la règle de grand-fathering est la plus souvent utilisée dans les accords nationaux ou multinationaux de partage d'une ressource rare. Cela s'explique par sa simplicité de mise en pratique, l'absence de rupture brutale avec le *status quo*, et éventuellement par le rapport de force existant entre les acteurs se partageant la ressource (le plus important pouvant imposer de conserver sa part historique). Cette règle, sur laquelle le protocole de Kyoto s'est fondé, a déjà posé deux types de problèmes :

- au sein même de l'OCDE, il a semblé nécessaire de différencier les taux de réduction parce que les efforts de réduction requis pouvaient être trop différents, il a aussi été permis pour certains pays de choisir une année de référence plus favorable que 1990 pour faciliter l'acceptabilité de la coordination ;
- les pays en développement rejettent cette règle du fait qu'elle limite leurs émissions aux niveaux actuels, ce qui ne tient pas compte de leur dynamique de développement dans les prochaines décennies. Ils accusent cette règle d'être profondément injuste (cf. Agarwal et Narain, 1991)

Une des solutions envisagée est alors de faire rentrer les pays en développement après leur décollage de développement, c'est-à-dire d'instaurer un seuil de revenu par tête pour arbitrer leur participation. Cependant même des simulations sans seuil d'entrée (application à toutes les régions dès 2012) montrent que les bénéfices nets ne suivent pas un découpage Nord-Sud attendu. La Figure 4 montre que les trois

régions de l'Asie sont largement bénéficiaires avec ce régime d'allocation, tandis que les régions LAM, MENA et SAFR en pâtissent. Les régions asiatiques sont bénéficiaires du fait de leurs capacités très importantes en abattement à bas coût (cf. la courbe de coût marginal d'abattement de SAS et CPA). Un autre point est que le niveau d'émissions de référence est celui de 2010 pour les pays entrant dans le régime en 2015 (USA et PED), ce qui implique des émissions déjà beaucoup plus élevées qu'en 1990, et une prise en compte du développement économique de la décennie 2000-2010. S'il convient de rester prudent sur ces opportunités à bas coût et le résultat qu'elles impliquent, ces simulations impliquent d'être aussi critiques vis à vis de l'injustice Nord-Sud associée couramment à la règle de grand-fathering.

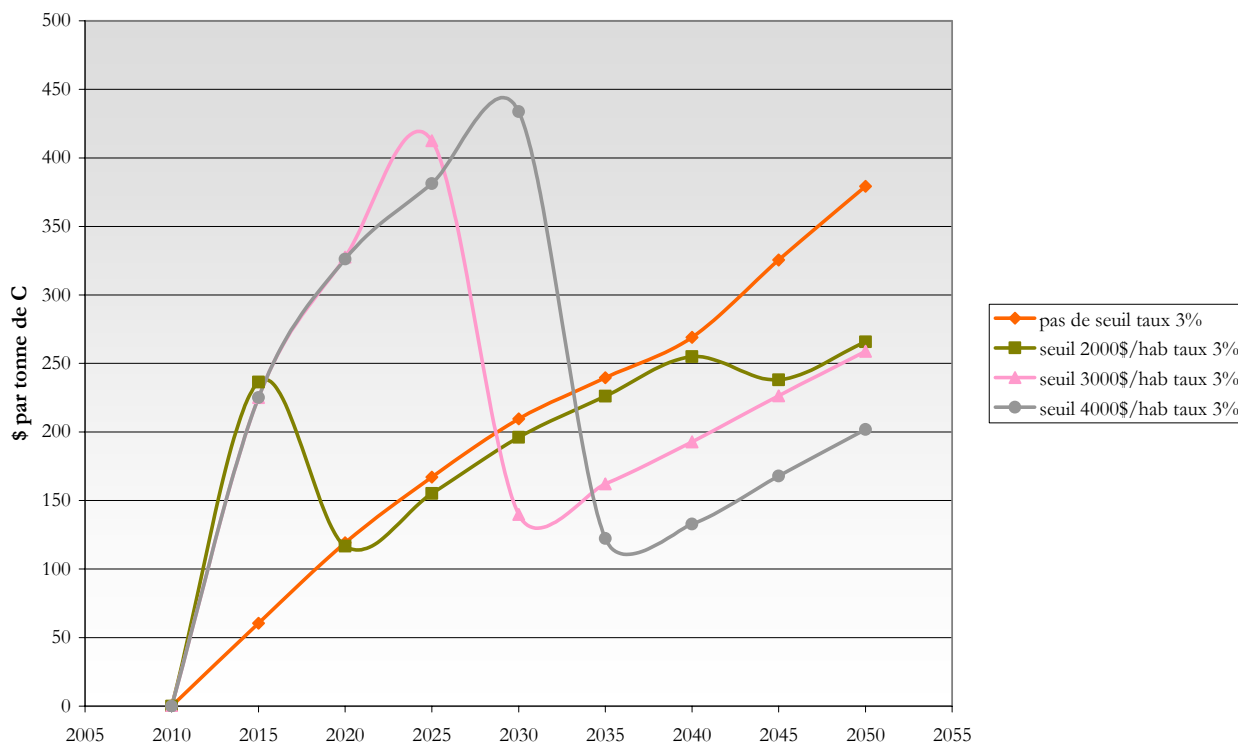


**Figure 4 : allocation grand-fathering sans seuil - somme actualisée des bénéfices nets 2012-2052**

L'intérêt d'un seuil d'entrée pour les PED reste entier, ne serait-ce que pour les régions LAM, MENA et SAFR. Les tests de sensibilité au seuil d'entrée, pris dans un intervalle allant de 0 à 4000 \$/hab/an, montrent un impact fort de ce seuil sur le profil du prix du carbone et sur les bénéfices nets des régions, tandis qu'au niveau de l'environnement, le budget total d'émissions de carbone est augmenté par le sursis supplémentaire accordé aux PED.

L'entrée par à-coups de régions comme CPA modifie fortement le signal-prix résultant du marché, du fait d'un apport important de possibilités de réductions bon marché. Le profil de prix crée marque une baisse plus ou moins forte à chaque entrée nouvelle d'une région PED (Figure 5). Par ailleurs, la région FSU, dont le PIB par tête est de 1860 \$/hab en 2015 (dans IIASA WEC A1), est éjectée du régime de coordination juste après Kyoto si le seuil est au-dessus de ce niveau. Au-delà des questions politiques que cela pose<sup>15</sup>, cela a un effet aggravant sur le prix du carbone, en ôtant au marché une quantité non-négligeable d'opportunités d'abattement bon marché. Cela explique la forte hausse du prix du carbone en 2015.

<sup>15</sup> Est-il possible d'éjecter ainsi la région FSU, alors que celle-ci est susceptible d'être bénéficiaire nette à court terme à cause de ses anciennes émissions très élevées (point de vue russe), et alors que la région FSU semble être un émetteur important de GES déjà présent dans la négociation (point de vue des pays de l'annexe B) ?

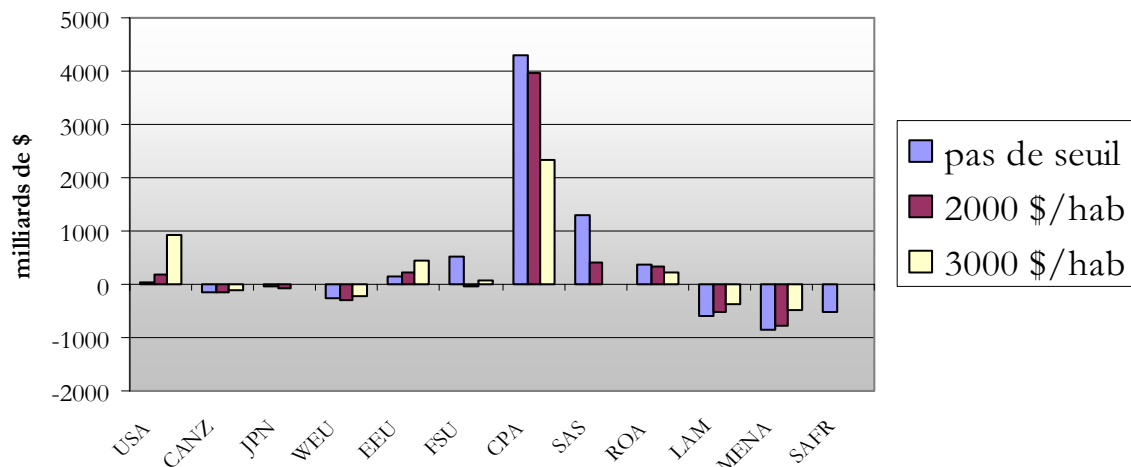


**Figure 5 : prix du carbone - grandfathering avec seuil**

Ce graphique met en évidence une dimension spécifique de l'arbitrage entre court-terme et long-terme : faire entrer les PED plus tard impose un prix plus élevé et moins d'opportunités d'abattement à bas coût sur le court ou moyen-terme, mais un prix plus clément sur le long-terme. Pour envisager cet arbitrage, il est nécessaire de s'attarder sur la sensibilité des bilans financiers actualisés nets<sup>16</sup> au seuil d'entrée. Cela nous permet de constater que pour certains pays industrialisés, dont les coûts de réduction sont les plus faibles au sein de l'annexe B, l'effet de court-terme (gains des échanges) engendre des bilans plus intéressants lorsque les PED rentrent plus tard dans la coordination. Il faut donc être critique sur l'intérêt de certains pays de l'annexe I à faire rentrer les PED immédiatement dans le régime de coordination.

D'un point de vue environnemental, il faut noter le fait qu'une entrée tardive des PED gonfle la facture carbone totale (pour un taux de  $-3\%$ , le budget de 2007 à 2052 est de 290 gigatonnes de C sans seuil, 315 gigatonnes pour 2000 \$ par tête, 335 gigatonnes pour 3000 \$ par tête), et relâche la pression globale sur les émissions.

<sup>16</sup> Nous prenons un taux d'actualisation uniforme de 5 % et tenons compte des coûts des neuf périodes.



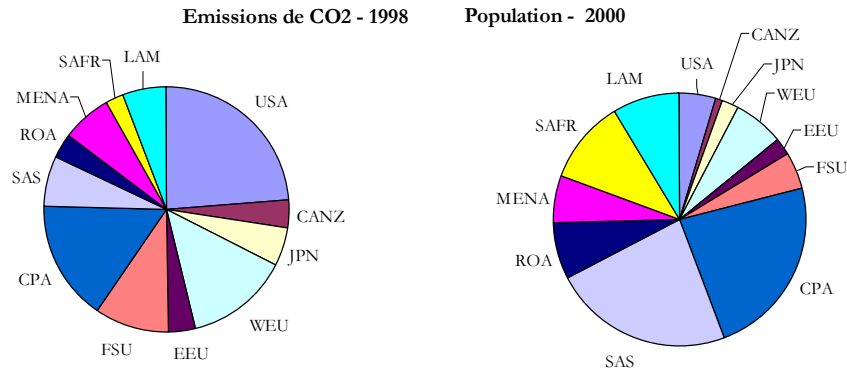
**Figure 6 : grandfathering avec seuil - somme actualisée des bénéfices nets 2012-2052**

Cependant, il importe de noter un défaut important du seuil appliqué aux PED, qui consiste à leur donner des incitations, sur le court-terme au moins, à gonfler leurs émissions, de manière à entrer dans le régime contraignant avec les émissions de référence plus importantes. Certains mécanismes peuvent limiter cette incitation en créant des incitations inverses : c'est le cas du Mécanisme de Développement Propre, ou des quotas non-contraignants proposés par [Philibert et Pershing, 2001].

## 2.2. Allocation par tête – proposition d'Agarwal.

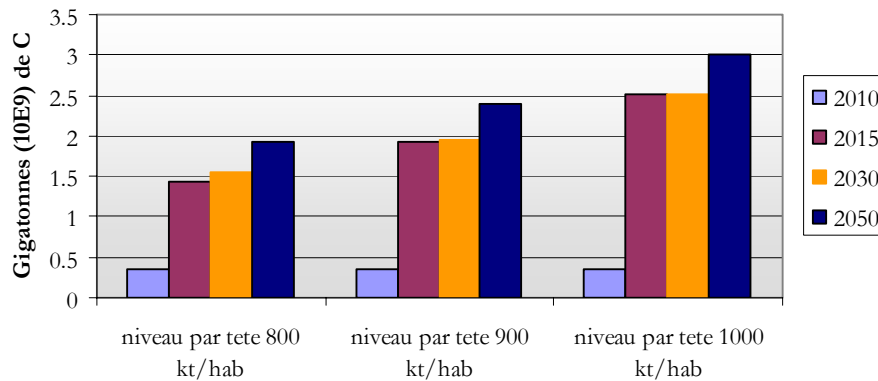
La règle d'allocation par tête est souvent vue comme une expression radicale et absolue de l'équité : la jouissance de l'atmosphère est un droit fondamental de l'être humain, et il est nécessaire de remédier au plus vite aux inégalités actuelles en redonnant à chaque être humain un égal quota d'émissions. Un avantage incontestable de cette règle est sa simplicité d'étude, puisqu'il suffit de regarder l'unique paramètre qu'est le montant du quota individuel<sup>17</sup>. Cette possibilité est rejetée par une majorité de pays développés, notamment sur l'argument que cela impliquerait des coûts trop élevés, dus à une transition trop brutale avec les niveaux d'émissions historiques. En effet une comparaison simple des parts actuelles des différentes régions dans la population et les émissions mondiales permet d'entrevoir le saut qu'il faudrait effectuer pour égaliser les émissions par tête.

<sup>17</sup> La mise en application dans chaque pays est loin d'être aussi simple, du fait de la nécessité de tenir parfaitement à jour le recensement de la population, et des problèmes politiques (équité intra-nationale) de gestion des droits individuels.



**Figure 7 : parts des régions du modèle dans les émissions et la population mondiales**

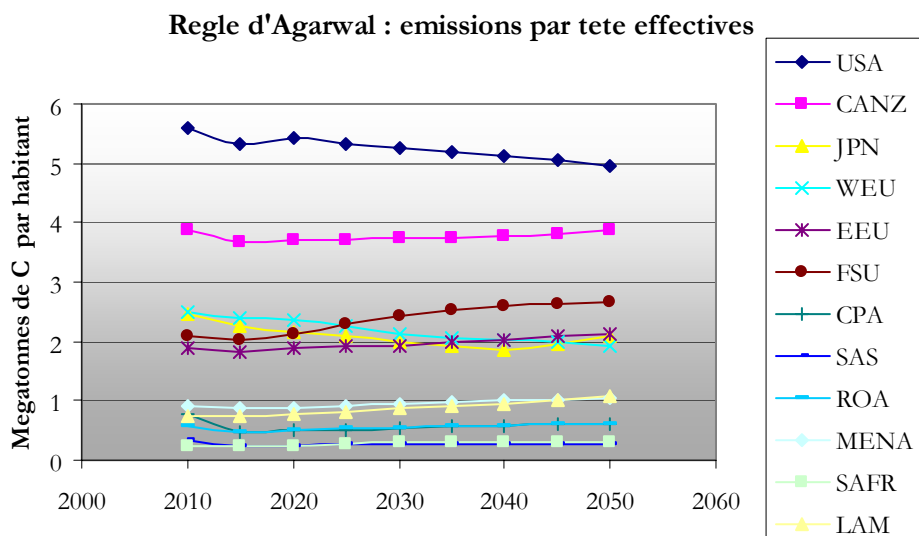
Une des caractéristiques de cette règle est d’attribuer des quotas surnuméraires (de l’air chaud) aux PED pendant une longue période de temps. En plus de leur capacité d’abattement importante à bas coût, qui leur permet de revendre une quantité importante de leurs quotas, ceux-ci disposent donc d’une rente financière non-négligeable avec ce « hot air » supplémentaire. Le graphique suivant regroupe la somme du « hot air » des pays possédant un excédent de quotas (il ne s’agit pas d’un « hot air » global par rapport aux émissions mondiales).



**Figure 8 : allocation égale par tête – montants d’air chaud distribué**

La transition entre le Protocole de Kyoto et ce régime d’allocation par tête est particulièrement brutale, tandis que l’évolution ultérieure est extrêmement stable, uniquement guidée par les changements du ratio émissions de référence totales sur population mondiale, qui décroît légèrement entre 2020 et 2050.

Enfin l’argument d’équité de cette règle, qui se fonde sur un droit universel et égal d’émettre dans l’atmosphère, est remis en question par les ré-allocations du marché, comme le souligne [Godard, 1999]. Le sens de ce droit égal est mis à mal par les émissions par tête *effectives* résultant des échanges de quotas, qui restent très loin d’un régime égalitaire, comme le montre le graphique suivant :



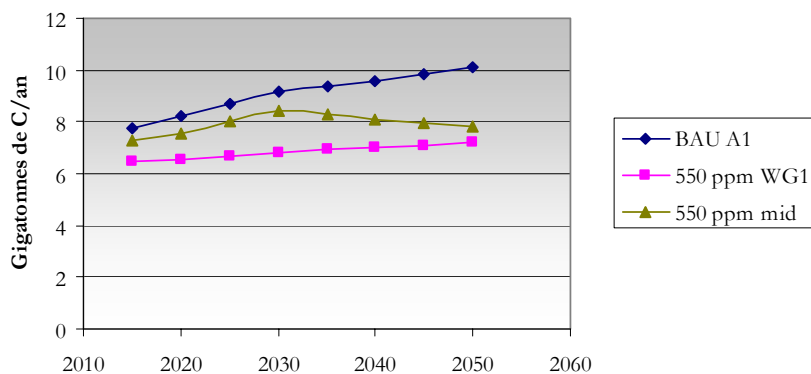
**Figure 9 : allocation égale par tête et émissions par tête effectives**

Bien évidemment cette faible réduction des émissions par tête est calculée sans prise en compte des effets d'équilibre général dus à des transferts massifs, liés aux volumes d'air chaud (quotas purement excédentaires) alloués aux PED et revendus aux pays industrialisés.

### 2.3. Contraction et convergence.

La règle de Contraction et Convergence semble a priori pouvoir réunir les deux approches précédentes en évitant une transition brutale lors des premières périodes, et en visant une convergence des émissions par tête à moyen-terme. Cette règle se caractérise d'abord par l'indépendance du système de répartition des quotas entre régions et de la détermination d'une enveloppe globale de quotas. Nous avons testé deux enveloppes possibles, fournies par Global Commons Institute, traduisant des trajectoires de stabilisation de la concentration de CO<sub>2</sub> à 550 ppm. La première est une trajectoire rigoureuse sur le court-terme, WG1, tandis que la seconde est plus souple (trajectoire médiane entre WG1 et WRE<sup>18</sup>) car elle prévoit d'agir plus sérieusement plus tard. La controverse sur la trajectoire optimale étant très active, la négociation, si elle aboutissait au choix de cette règle comme base de travail, devrait s'attaquer au difficile problème de la fixation d'une cible environnementale sur plusieurs périodes consécutives, même s'il n'est pas exclu que dans des re-négociations ultérieures des révisions de l'enveloppe globale, mais pas de la règle elle-même, soit envisageables.

<sup>18</sup> Nous n'avons pas testé 550 ppm WRE, parce que dans la moitié des scénarios, cette trajectoire est réalisée sans efforts.

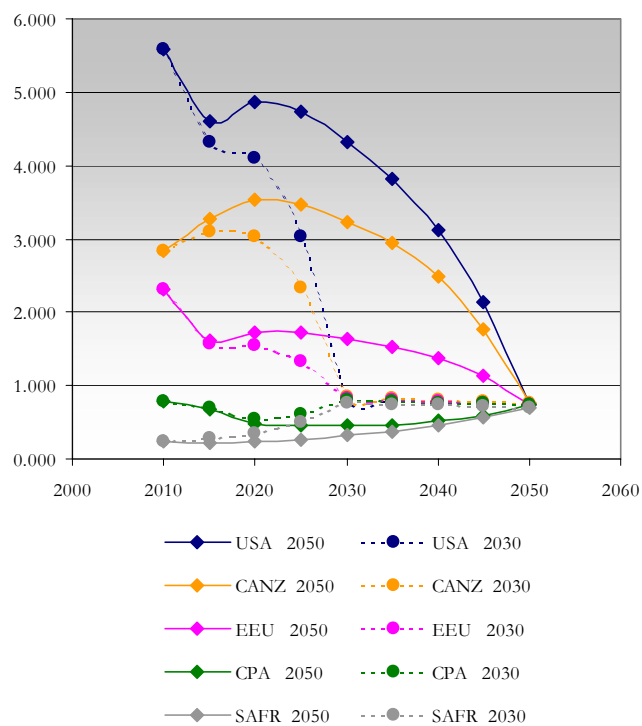
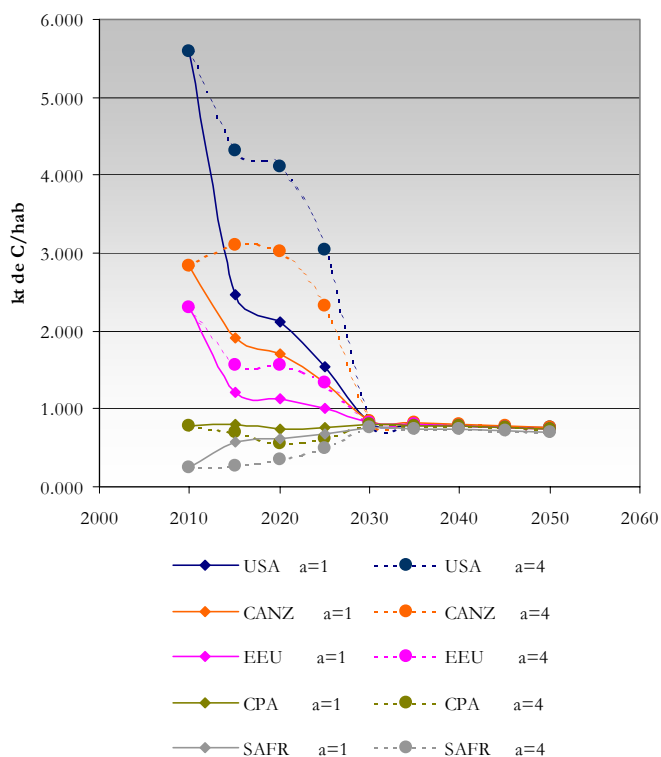


**Figure 10 : enveloppes d'émissions Contraction & Convergence**

Une fois l'enveloppe d'émissions globales fixée, deux paramètres restent à fixer : la date de convergence des allocations par tête, et le rythme de convergence, via le multiplicateur  $a$  dans l'exposant de la formule de partage des quotas. Dans la proposition originale, la date de convergence est 2030 et  $a=4$ . Une étude de sensibilité sur ces paramètres montre que ces paramètres permettent de modifier sensiblement le schéma de convergence des allocations par tête, et donc les coûts de la transition pour les différentes Parties :

Influence du parametre  $a$  sur le schema de convergence des allocations par tete (convergence en 2030)

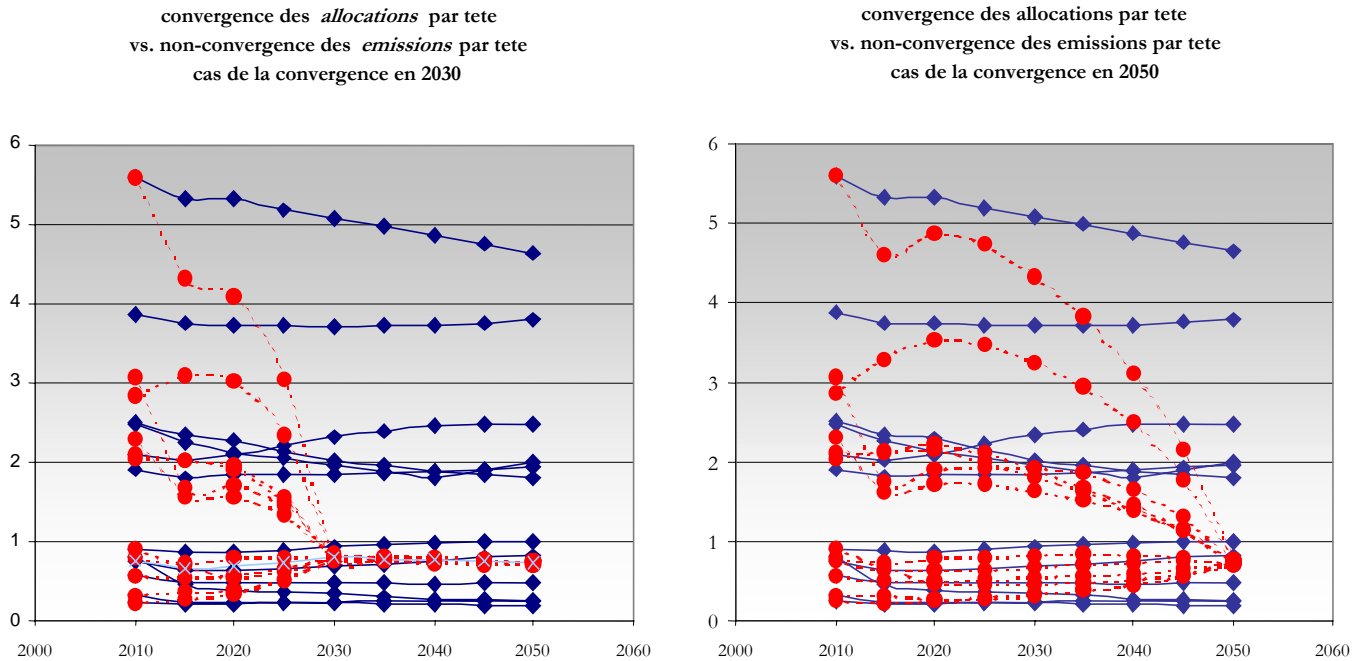
Influence de la date de convergence sur le schema de convergence des allocations par tete ( $a=4$ )



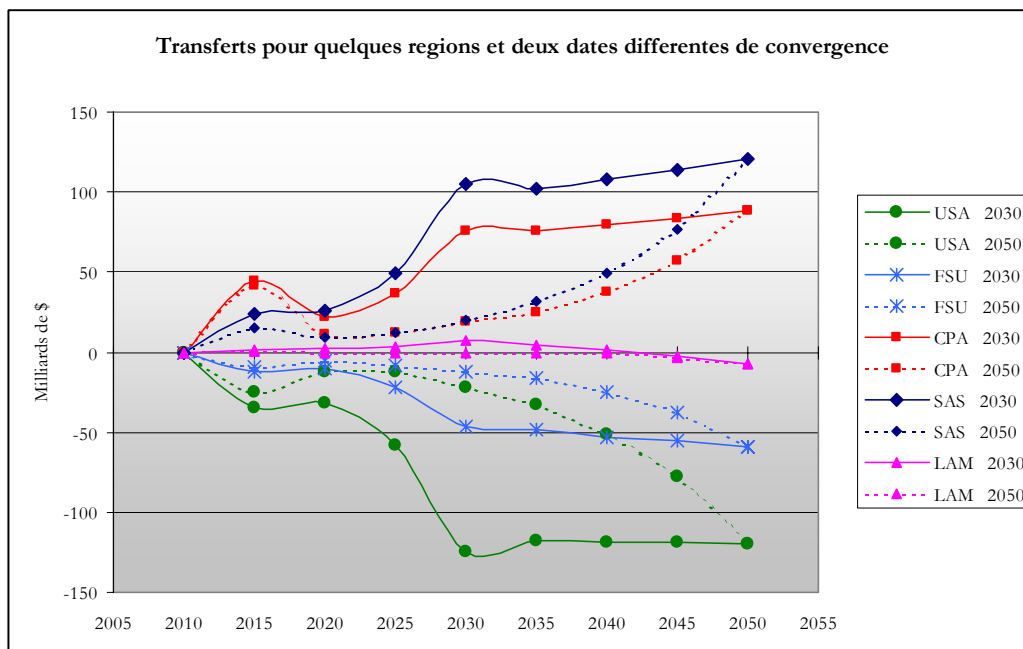
**Figure 11 : Contraction & Convergence - tests de sensibilité**

Par contre, de même que pour la règle d'allocation immédiate par tête, les émissions par tête *effectives* ne dépendent que du montant global de l'enveloppe de quotas et des différences de coûts marginaux d'abattement entre les régions, du fait qu'il y ait un marché d'échange des quotas. Il est là aussi frappant de comparer allocations par tête et émissions effectives par tête : le marché supprime toute convergence dans

la réalité. La convergence des allocations revient en fait à effectuer une transition vers un régime de transferts stabilisés des pays dont les émissions par tête sont supérieures au niveau de convergence vers ceux dont les émissions par tête sont inférieures à ce niveau. Les graphiques suivants montrent ce décalage et donnent un aperçu des transferts impliqués.



**Figure 12 : Contraction & Convergence - quotas alloués (rouge) vs. émissions effectives (bleu)**



**Figure 13 : Contraction & Convergence - transferts de capitaux**



## 2.4. Règle « H. Jacoby »

Les deux règles suivantes abandonnent le concept de convergence des émissions par tête. Elles se focalisent beaucoup plus sur les déterminants pragmatiques des réductions d'émissions : capacité de payer<sup>19</sup> pour la proposition de Jacoby, opportunités de réduction et responsabilité en plus pour la règle multicritère norvégienne. Par ailleurs elles s'expriment en taux de réduction, ce qui implique qu'elles évitent une transition brutale entre la période de Kyoto et la seconde période d'engagement.

La règle de Jacoby est caractérisée elle aussi par un seuil d'entrée des PED. Elle présente un comportement assez semblable à la règle de grand-fathering, mais avec une différenciation du taux de réduction selon les niveaux de revenu, en incluant le seuil dans la formule donnant le taux de réduction. L'étude de sensibilité du prix du carbone aux quatre paramètres montre que, sur les intervalles étudiés, seul le paramètre  $\beta$ , qui concerne le taux de réduction de long-terme, n'a que peu d'influence sur le prix du carbone.

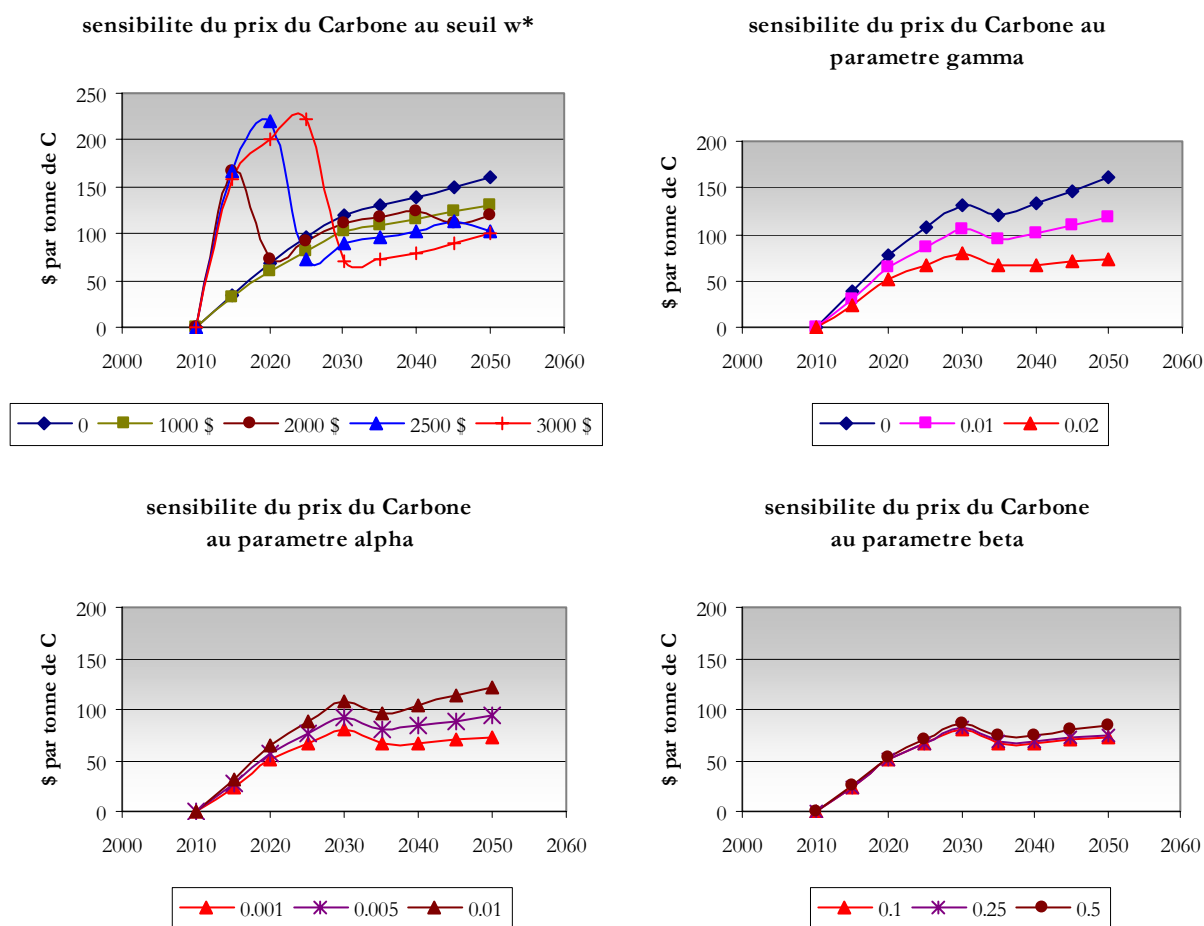
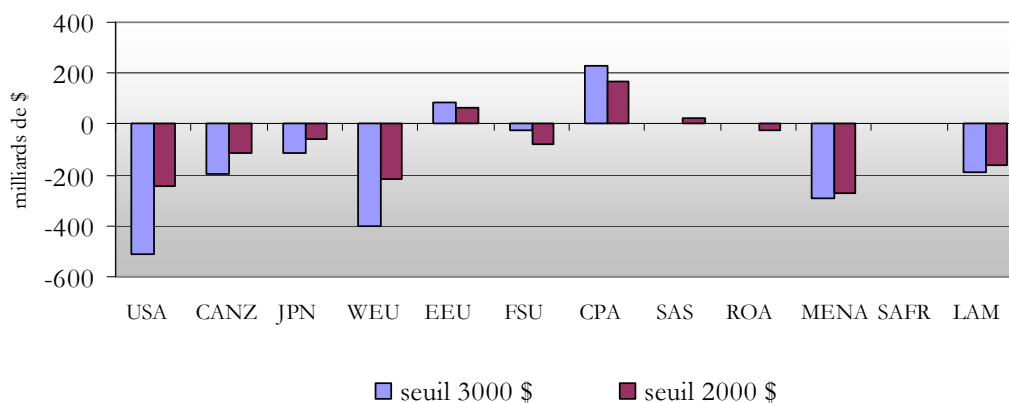


Figure 14 : Règle de Jacoby - étude de sensibilité des principaux paramètres

La sensibilité du prix du carbone au seuil d'entrée montre un profil sensiblement identique à celui obtenu pour la règle de grandfathering. Il y a donc la même question d'arbitrage entre seuil élevé et prix de faible à

<sup>19</sup> Ce qui diffère du *consentement à payer*, même si ces deux grandeurs sont considérées croissantes en fonction du revenu.

long terme, et seuil bas et prix faible sur le court terme. Par ailleurs le paramètre  $\gamma$  représente la croissance positive maximale des émissions pour les pays entrant juste dans le régime contraignant. On peut donc imaginer un autre arbitrage entre marge de manœuvre initiale  $\gamma$  et seuil d'entrée  $w^*$ , en choisissant ou bien de faire rentrer les PED tôt mais en leur laissant de la marge de croissance des émissions, soit en élevant le seuil d'entrée mais en adoptant un régime de réduction plus strict une fois rentré. Pour étudier cela, nous avons pris deux jeux de paramètres donnant le même budget carbone sur la période 2008-2052, correspondant à ces deux cas de figures : ( $\alpha=0.03$ ,  $\beta=0.2$ ,  $\gamma=0.25$ ,  $w^*=3000$  \$) et ( $\alpha=0.03$ ,  $\beta=0.2$ ,  $\gamma=0.45$ ,  $w^*=2000$  \$), pour un budget identique de 340 gigatonnes de carbone et le même scénario de référence A1 de l'IIASA. Le graphique suivant montre les bénéfices nets actualisés (opposé du coût net actualisé des politiques climatiques) pour ces deux cas et les 12 régions de notre modèle.

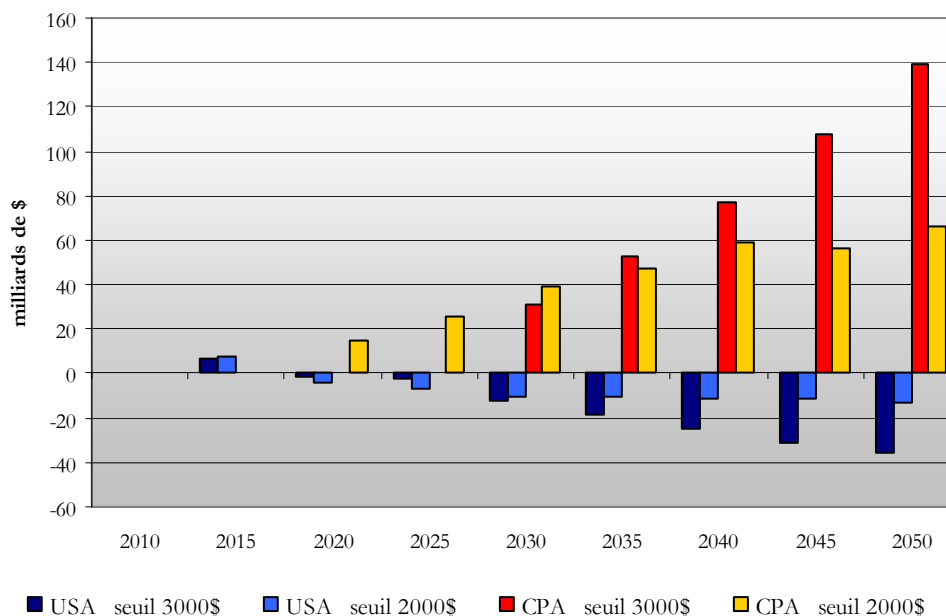


**Figure 15 : Règle de Jacoby – bénéfice actualisé pour deux paramétrages différents**

Cela permet de souligner l'importance des paramètres  $\gamma$  et  $w^*$ , pour deux raisons :

- la recherche d'un jeu de paramètres qui rapproche le plus les conséquences financières des volontés de payer et/ou des consentements à recevoir est peut-être possible pour cette règle ;
- l'utilisation stratégique des valeurs données aux paramètres est possible, car les résultats de sensibilité montrent que leur implications sur les coûts totaux ne sont pas négligeables ;

Il faut aussi noter que du fait que ces deux jeux de paramètres permettent d'atteindre le même budget carbone sur la période considérée, l'entrée plus rapide des PED entraîne un transferts global d'efforts des pays développés vers les PED. Plus de réduction étant effectuées dès le court terme, la contrainte globale sur les émissions de long terme est plus lâche. Lorsque le seuil est faible, on observe une hausse des transferts financiers sur le court terme (ce qui se justifie par la vente de permis peu chers par les PED entrants), et une baisse des transferts sur le long terme (du fait de l'effet de différence de forme de l'enveloppe globale des émissions expliquée juste précédemment), comme le montre la Figure 16.



**Figure 16 : règle de Jacoby - transferts financiers pour USA et CPA**

## 2.5. Règle multi-critères norvégienne.

La règle multi-critères proposée par la Norvège est en quelque sorte un élargissement du point de vue précédent à plusieurs indicateurs. Alors que la règle de Jacoby se limite à la capacité de payer, cette règle couvre la capacité de payer, l'opportunité de réduire les émissions nationales, et l'inégalité actuelle de répartition des émissions par tête. Cette règle a déjà été étudiée par [Reiner et Jacoby, 1997], qui soulignent son intérêt pour la négociation.

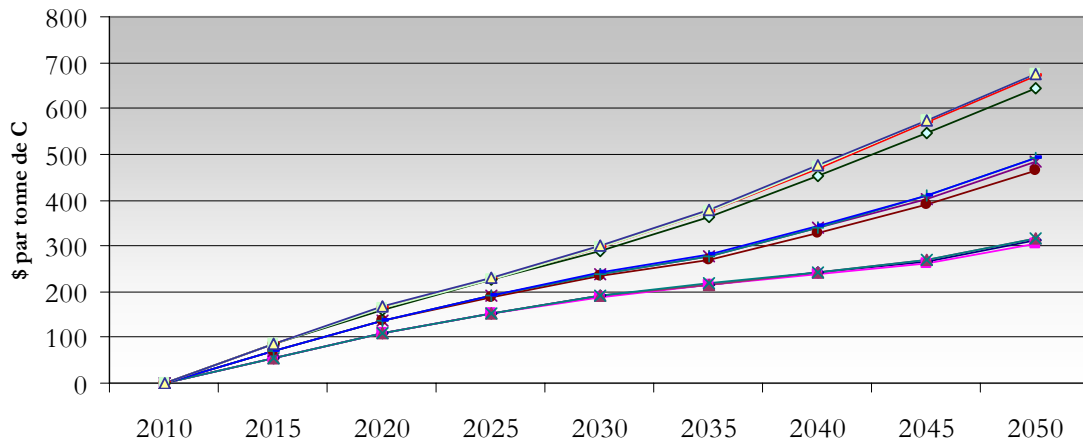
La proposition initiale étant destinée uniquement aux pays de l'annexe B, nous y avons ajouté un seuil d'entrée pour pouvoir l'appliquer à l'ensemble des 12 régions du modèle. Une autre solution pourrait être de prévoir dans la formule des taux positifs d'évolution des émissions en intégrant non pas les ratios entre chaque critère et sa moyenne mondiale, mais le ratio de l'écart algébrique entre le critère et sa moyenne mondiale sur la moyenne mondiale (ainsi tous les pays en-dessous de la moyenne mondiale bénéficient d'un allègement de réduction).

En ce qui concerne les traits marquants de la proposition norvégienne, nous retrouvons une sensibilité au seuil similaire aux règles de Jacoby et de grandfathering, c'est pourquoi nous ne nous attardons pas plus sur ce point. Nous détaillons par contre la sensibilité de la règle aux autres paramètres, que sont les poids respectifs des trois critères et le paramètre d'échelle des réductions (avec un seuil nul, pour ne pas perturber les simulations avec des effets d'entrée des PED). Quatre jeux de poids ont été envisagés :

- Une simulation avec des poids égaux pour les trois critères,
- Trois simulations avec un poids de 0,5 pour un critère et de 0,25 pour les deux autres.  
(c1 pour E/GDP, c2 pour E/POP, c3 pour GDP/POP)

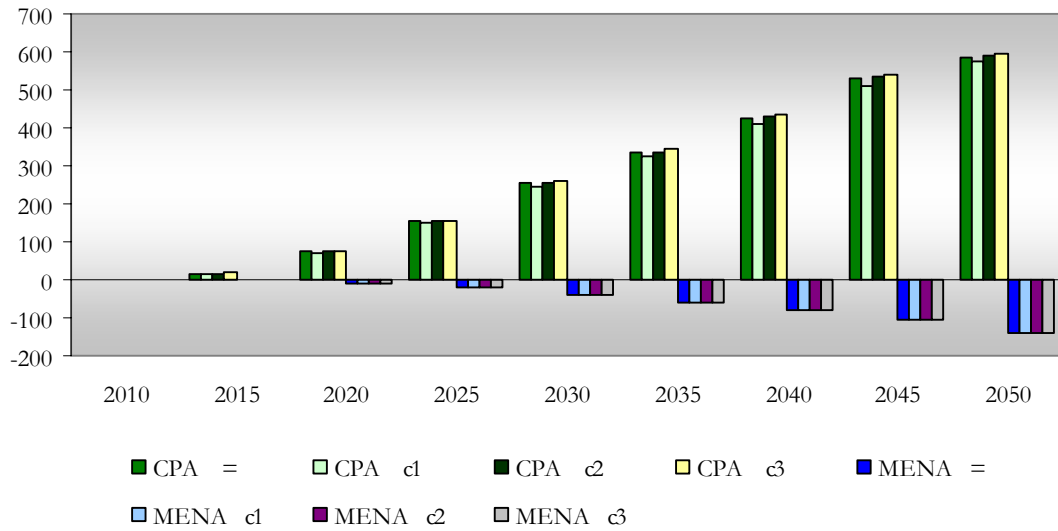
Les résultats de nos simulations permettent de dégager ces quelques points :

- du point de vue du prix du carbone, la sensibilité aux poids choisis semble très faible, alors que le paramètre d'échelle joue effectivement le rôle de variable d'ajustement de l'objectif de réduction global des émissions, donc de la contrainte sur le carbone. La Figure 17 regroupe douze simulations : trois paramètres d'échelle différents, et quatre jeux de poids distincts. Il apparaît que les simulations avec le même paramètre d'échelle sont très proches, quel que soit le jeu de poids utilisé.

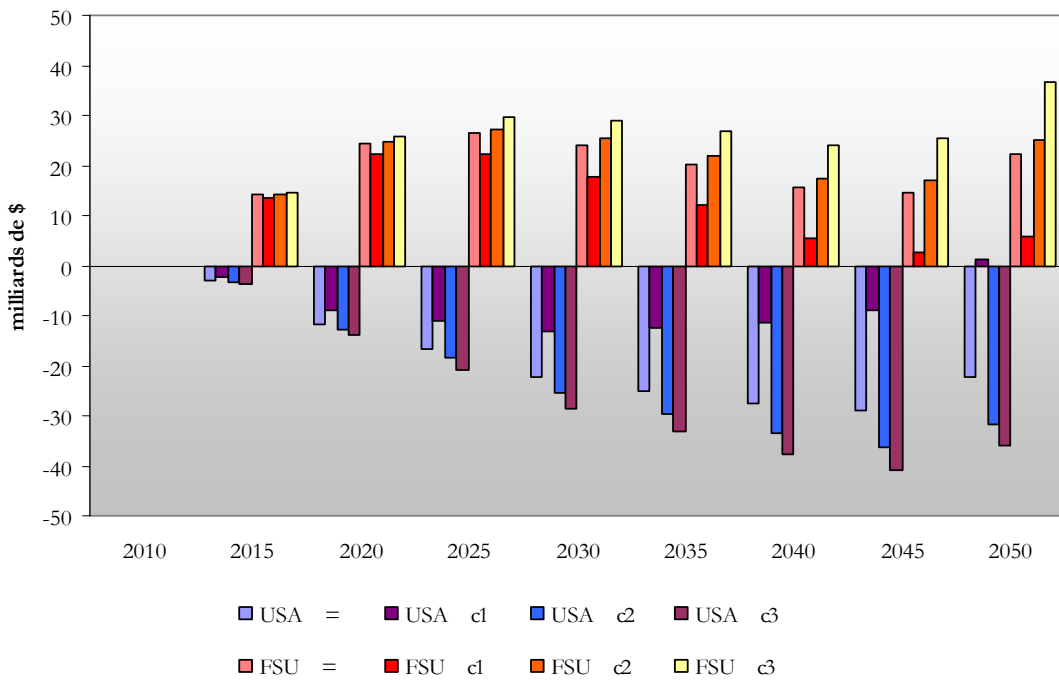


**Figure 17 : règle multicritères - tests de sensibilité**

- la sensibilité des coûts totaux varie d'une région à l'autre. Les bilans des régions CPA et MENA montrent par exemple une sensibilité très faible, tandis que ceux des régions USA et FSU se révèlent plus sensibles, en particulier pour le jeu de poids donnant un poids double à l'intensité énergétique, qui favorise les USA. Pour vérifier cela, nous avons reporté les taux de réduction correspondant aux différents jeux de poids dans le troisième graphique ci-dessous. On remarque alors que la région CPA a elle aussi un taux de réduction assez différent dans le cas du poids double donné au PIB par tête. Mais en fait, cette différence de taux de réduction ne modifie que légèrement les coûts d'abattement domestique et le marché, globalement toujours aussi demandeur de permis (le prix du carbone et l'enveloppe totale d'émissions sont insensible au jeu de poids), garantit une rente du même ordre à cette région (dans ce cas la diminution du nombre de permis à vendre est très faible devant la rente totale). Du côté des USA, par contre, les réductions requises étant réduites, les coûts domestiques (courbe très pentue) et les dépenses d'achat des permis sont réduits d'autant.

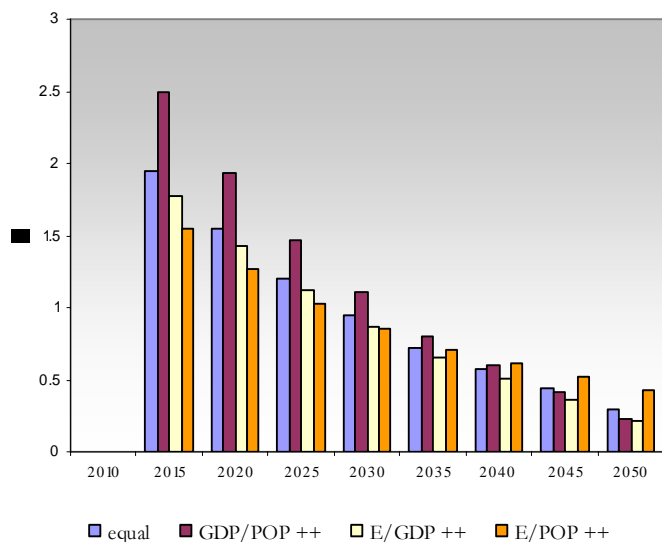


**Figure 18 : règle multicritères - sensibilité des coûts nets pour CPA et MENA**



**Figure 19 : règle multicritères - sensibilité des coûts nets pour USA et FSU**

regle multicritere : taux de reduction de CPA en fonction du jeu de poids



regle multicritere : taux de reduction des USA en fonction du jeu de poids

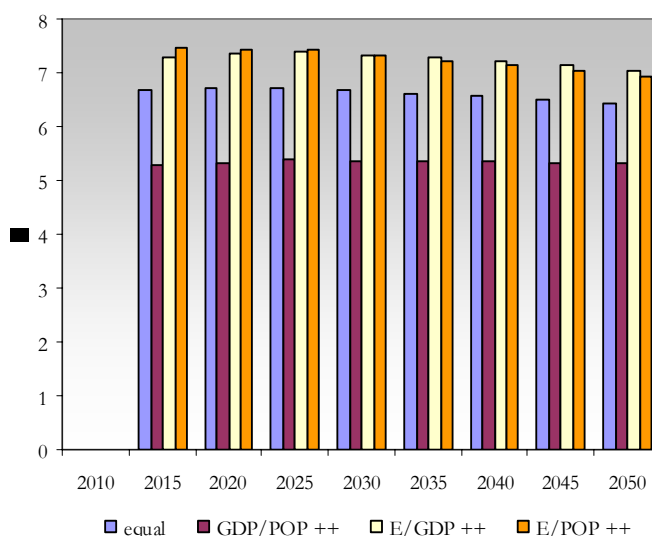


Figure 20 : règle multicritère - sensibilité des taux de réduction requis pour CPA et USA

Dans une publication consacrée à l'étude des différentes règles de la famille « multi-critères », appliquées uniquement à l'annexe B, [Ringius et al., 1998] suggèrent que ce type de règles pourrait permettre de faciliter la négociation, du fait de leur géométrie variable, et qu'il est peut-être possible d'ajuster de telles formules pour se rapprocher d'une solution la plus équitable (nous dirions plutôt *acceptable*) possible<sup>20</sup>. Cependant nous trouvons des sensibilités globalement très inférieures aux sensibilités testées dans cette publication pour des jeux de poids comparables. Cela signifie peut-être que l'élargissement au monde entier de telles règles diminue la sensibilité des coûts finaux aux poids des différents critères. De manière générale, cela limite la flexibilité de ces règles et les facilités d'ajustement mentionnées par ces auteurs.

### 3. QUESTIONS TRANSVERSALES.

Ce tour d'horizon montre que les règles ont parfois un comportement non conforme à l'intuition, et présentent des mécanismes non triviaux. Il permet d'autre part d'identifier les principaux mécanismes à l'œuvre derrière les variations de comportement des règles. Nous traitons dans les paragraphes suivants ceux qui nous semblent primordiaux non seulement pour une bonne compréhension de ces règles, mais aussi pour replacer notre problème dans son contexte politique et économique plus large que le cadre de modélisation lui-même.

#### 3.1. Seuil et incitations à entrer des PED.

Comme nous l'avons montré pour les règles de grand-fathering et de Jacoby, les conditions d'entrée des PED constituent en fait un paramètre crucial pour anticiper le profil futur du prix du carbone, ce qui donne en quelque sorte un signal sur les contraintes futures sur le carbone. Ce paramètre

<sup>20</sup> 'It is possible, moreover, that these formulae could be adjusted so as to produce more equitable results, or that more equitable formulae could be developed.'

pose des problèmes plus complexes que ceux que l'on pouvait attendre, parce qu'il se situe au carrefour de plusieurs préoccupations :

- **La satisfaction d'un objectif environnemental global** : pour une cible de concentration fixée, une entrée plus tardive des PED doit être compensée par une charge plus forte sur les pays de l'annexe I et/ou un régime plus rigoureux pour les PED une fois qu'ils prennent des engagements. L'entrée des PED reste indispensable à moyen terme, tant du point de vue politique, que du point de vue environnemental, puisqu'il est envisagé que les PED atteignent 50% des émissions mondiales vers 2020.
- **Le contrôle du profil de la contrainte sur le carbone** au fil des périodes : instaurer un seuil d'entrée ne suffit pas et la valeur de ce seuil elle-même a encore des implications complexes. Elle permet soit de profiter des opportunités d'abattement bon marché dès le court terme, soit de projeter de les utiliser plus tard, lorsque la tension sur le carbone deviendra trop forte. Les incertitudes sur les coûts et les *baselines* d'émissions rendent aussi les opportunités de réduction à bas coûts plus aléatoires sur le long terme.
- **La redistribution du surplus créé par le marché** : à travers l'impact fort du seuil sur le prix du carbone, ce sont les transferts qui sont fortement modifiés au cours du temps. Les PED possédant une quantité importante de *hot air* ou de potentiels de réduction à bas coûts (Asie surtout) ont tout intérêt à rentrer assez tôt, pour profiter de cette rente dès que possible. Dans notre modèle leurs bénéfices sont très élevés et persistent jusqu'à la fin de notre période d'étude ; il est probable qu'en réalité, les « grands débiteurs » de l'Asie par exemple imposent une renégociation des règles d'allocation en cas de transferts importants trop persistants. Une question qui se pose en filigrane de ces remarques est celle de la brutalité de la transition. Comment les pays de l'annexe B accepteront-ils de subir d'une période à l'autre un changement si radical dans leurs dépenses climatiques, en reportant une partie importante des dépenses effectuées sur leur sol vers un transfert généralisé vers des PED ? Il semble que des mécanismes de flexibilité du type CDM puissent être vus comme des possibilités de transition douce vers ces transferts à grande échelle, mais comme le souligne (Victor, 2000), probablement à juste titre, les ordres de grandeur ne sont pas du tout les mêmes (le CDM étant peu susceptible, avec ses modalités et ses coûts de transaction actuelles, d'entraîner des transferts de dizaines de milliards de dollars par an).

De manière générale, ces quelques remarques suggèrent qu'un seuil d'entrée est une variable très stratégique, qui impose d'avoir une vision de long terme et quelques assurances sur la pérennité de la règle d'allocation négociée sur plusieurs périodes.

### 3.2. Des questions sur les opportunités d'abattement en Asie.

Parmi les paramètres explicatifs du comportement du marché du carbone dans nos simulations, il convient de souligner l'importance prise par les larges opportunités d'abattement à bas coût dans les PED et surtout en Asie. L'impact des hypothèses retenues sur les écarts de coût entre PED et pays industrialisés, et sur le niveau absolu des courbes de coût asiatiques est tel qu'il convient de s'interroger sur sa validité.

- Les courbes de coût d'abattement utilisées pour les régions d'Asie sont-elles réalistes ?

Ces courbes, calées sur le modèle EPPA (MIT), sont très basses relativement à celles des autres PED et encore plus par rapport à celles des pays développés ou en transition. Deux éléments peuvent expliquer ces différences :

- des coûts d'abattement plus faibles, à cause de coûts techniques plus faibles pour les mêmes projets ou à cause d'une intensité carbone plus importante au départ, qui cacherait des opportunités de décarbonisation déjà saisies dans le passé dans les pays industrialisés (courbe abaissée verticalement) ;
- un effet « volume » : selon la taille des économies, un même changement de technologie correspond à plus de réductions (étirement horizontal de la courbe). Cependant, nous avons atténué cet effet en convertissant des courbes graduées au départ en niveau absolu de réduction en courbes graduées selon un axe horizontal en pourcentage du niveau de référence ? Cela permet de supprimer cet effet sur la courbe manipulée. Il n'est pas supprimé pour autant dans les simulations, puisque on applique ces courbes en pourcentage à la taille de l'économie asiatique dans les scénarios de long-terme.

L'effet de coûts différenciés devrait être assez limité par la mondialisation des échanges, la diffusion rapide du progrès technique et les mécanismes de transfert de technologie : en fait, du point de vue du coût micro-économique de la tonne de carbone non-émise, seul la partie correspondant au coût du travail est susceptible de différer vraiment d'une région à l'autre. Nous pensons donc que les courbes diffèrent surtout à cause des quantités et de la nature des potentiels de réduction plus que de leurs coûts. Alors, dans cet ordre d'idée, il semble possible que le grand nombre de potentiels à bas coûts représentés par nos courbes de coûts d'abattement soient assez réalistes. En effet, certaines prévisions corroborent ces hypothèses de potentiels à bas coûts en laissant entrevoir de considérables « gisements » d'opportunités de réduction : la Chine aurait besoin dans les 20 prochaines années de réaliser 600 milliards de dollars d'investissement dans la production d'électricité, selon l'AIE, et la moitié des logements nécessaires pour sa future population en 2015 sont encore à construire d'après (World development Report, 2001, Banque Mondiale).

- Peut-on valider les conséquences de ces courbes de coûts d'abattement sur les résultats de notre modèle ?

L'utilisation de ces courbes entraîne, dès que la pression environnementale sur les émissions se fait assez forte, des taux d'abattement élevés pour les régions CPA et SAS. Ces niveaux, par exemple 60, 70 ou 80% d'abattement par rapport au scénario de référence, posent question. D'une part le niveau absolu de ces abattements est problématique : est-ce possible que la Chine réalise 70% d'abattement à un coût marginal de 140\$ par tonne ? D'autre part ces niveaux d'abattement sont quasi-instantanés lorsque ces régions rentrent sur le marché de carbone, qui se trouvent alors dans une fourchette de prix allant de 100\$ à 200\$ par tonne de C : est-ce possible que la Chine réalise 50 % d'abattement supplémentaire en une seule période de 5 ans ?

Cela nous conduit à nous interroger sur la pertinence des courbes de coûts d'abattement et de leur utilisation relativement simple dans notre modèle. Ici il serait nécessaire de décrire correctement les stocks de capitaux installés, leur période de renouvellement et le surcoût engendré par un renouvellement trop rapide, ainsi que les coûts de transaction liés aux échanges de permis massifs que cela engendre ensuite. On trouvera en annexe une discussion méthodologique sur les possibilités envisagées pour contourner ce problème.



- Peut-on conserver de telles différences dans les courbes de coût sur nos 9 périodes ?

Répéter ces courbes d'abattement particulièrement basses sur 9 périodes a-t-il un sens ? Par exemple la Chine se trouvera dans les 15 prochaines années devant d'importants investissements nécessaires pour se moderniser (logement, énergie, industrie, transports), mais au-delà de ces 15 années environ, quelles seront réellement ses opportunités de réduction ? Il est probable que dans un tel cas, quelques périodes d'abattement très poussé, de politiques de réduction très incitatives, suffiraient à « assécher » une partie des opportunités d'abattement à bas coûts présentées dans les courbes de coûts utilisées : notre hypothèse d'apparition de nouvelles opportunités d'abattement à tous les niveaux de prix à toutes les périodes est quelque peu mis à mal. A contrario, un report des réductions à des périodes ultérieures, risquerait de priver la Chine de ses potentiels de réduction à bas coûts, du fait d'un possible « lock-in » dans une trajectoire intensive en carbone (notamment via le charbon pour l'énergie et le pétrole pour les transports), à cause d'infrastructures non adaptées à une décarbonisation poussée.

Nous abordons ici un problème structurel dans ce type d'approche de modélisation, lié à l'utilisation de courbes de coûts marginaux d'abattement construites en dehors de leur cadre de modélisation d'origine. Or « on ne sait pas » trancher entre les deux hypothèses de travail mentionnées ci-dessus, à savoir l'épuisement des opportunités à coûts faibles dans le futur, ou leur renouvellement dans un mix d'opportunités contenant toujours une part importante « d'imperfections ».

### 3.3. Incertitudes sur le prix du carbone et les transferts.

En aval de la discussion sur la validité de ces courbes d'abattement et de leur utilisation, il convient maintenant d'examiner les bilans financiers des régions après fonctionnement du marché de quotas.

En premier lieu, les simulations effectuées correspondent à des budgets de carbone de 300 à 400 gigatonnes de carbone émises entre 2008 et 2052, ce qui équivaut à des trajectoires basses visant une concentration de long terme stabilisée à 550 ppm. En conséquence la contrainte qui pèse sur le carbone dans les huit périodes considérées après Kyoto est relativement importante, conduisant à des prix du carbone souvent au-dessus de 100 \$ par tonne dès la période 2012 – 2017.

Les dynamiques de prix du carbone et les intervalles d'incertitude sont assez fortement dépendants de la règle concernée. Dans la règle Contraction & Convergence, les prix croissent quasi linéairement, balayant un intervalle de 0 à 95 dollars en 2015 (moy 52\$), 0 à 165 dollars en 2050 (moy. 165\$). On retrouve dans la stabilité du prix la conséquence d'un marché élargi à l'ensemble des régions dès 2012 et d'une enveloppe d'émissions relativement progressive. Dans la règle d'allocation immédiate par tête, les prix sont très haut dès 2012 (moy 102 \$, max 162\$) du fait que l'enveloppe induite par la formule retenue est plus sévère par rapport à la référence, mais la stabilité du prix est très grande au-delà de la seconde période. Dans les trois autres règles, incluant des seuils d'entrée pour les PED, on retrouve les instabilités dynamiques mentionnées plus haut dans la discussion à propos des seuils d'entrée dans le régime contraignant. Dans ces règles, la forte poussée du prix du carbone est compensée plus tard par un affaissement important du aux nouvelles opportunités de réduction bon marché.

Ensuite, ce prix du carbone est un facteur multiplicateur des montants des transferts entre régions à coûts d'abattement élevés et régions à coûts d'abattement faibles. Nous nous concentrons ici sur les transferts financiers, mesurables ex post ou anticipés ex ante par les acteurs. La dimension de ces transferts est problématique dans certaines règles, comme celle d'allocation par tête des quotas : nos simulations montrent des transferts allant jusqu'à 300 milliards de dollars par an ! Le Tableau 3 recense les intervalles des montants des transferts, pour toutes les règles et tous les scénarios, ou pour toutes les règles

sauf l'allocation par tête, et tous les scénarios sauf les plus extrêmes (IS92e et f), ainsi que les montants d'aide au développement en 2000 (données Banque Mondiale)<sup>21</sup>.

Ces transferts annuels posent en premier lieu des problèmes de nature économique :

- au niveau macroéconomique, la balance des paiements des pays sera modifiée de manière importante par de tels flux financiers, risquant de provoquer des déséquilibres en chaîne sur d'autres marchés financiers ou commerciaux (McKibbin). Un modèle d'équilibre général complet serait nécessaire pour rendre compte de tels effets et de leur caractère déstabilisant pour les économies nationales.

- au niveau microéconomique, le recyclage de ces montants dans le système fiscal ou productif des régions ne sera pas sans conséquence sur les vecteurs de prix domestiques, les rythmes d'inflation, les taux de salaire et enfin sur le niveau de consommation par tête. Les simulations en équilibre général mentionnées dans le paragraphe 3.2 au chapitre 1 permettent de saisir les enjeux de cette discussion.

Région	Aide au développement (2000)	Ni la règle d'Agarwal ni les scénarios extrêmes.	Tous scénarios, toutes règles
FSU	3.8 milliards \$	-52 to +10 milliards \$	-87 to +80 milliards \$
MENA	5.1 milliards \$	-18 to 0 milliards \$	-52 to 0 milliards \$
CPA	4.6 milliards \$	0 to +32 milliards \$	0 to +252 milliards \$
SAS	4.1 milliards \$	0 to +12 milliards \$	0 to +294 milliards \$
ROA	3.1 milliards \$	0 to +4 milliards \$	0 to +61 milliards \$
SAFR	12.3 milliards \$	0 to +10 milliards \$	0 to +172 milliards \$
LAM	3.4 milliards \$	0 to +44 milliards \$	0 to +69 milliards \$

**Tableau 3 : transferts dus au marché de carbone et APD**

Il est par ailleurs nécessaire de mentionner qu'au-delà des incertitudes pesant sur les trajectoires futures, les styles de consommation, les évolutions des systèmes techniques et les coûts de décarbonisation de l'économie qui en découlent, une large incertitude pèse aussi sur le contexte institutionnel dans lequel s'organiseront les négociations futures. La géopolitique des ressources fossiles, le basculement potentiel des rapports de force commerciaux, monétaires ou démographiques dans les instances internationales, le retour d'expérience au bout de quelques années de fonctionnement du système international de quotas de GES, sont des paramètres incertains conditionnant fortement les anticipations de moyen-terme des agents économiques, la localisation des activités, les chemins de croissance régionaux. Pour saisir l'ensemble de ces mécanismes de manière cohérente, il n'existe pas de modèle « fiable », tant sur les hypothèses de comportement que sur le mode de calibrage de ses paramètres. L'approche de modélisation en équilibre partiel retenue dans ce chapitre reste robuste dans ses résultats, à condition d'en comprendre les limites.

#### 4. NÉGOCIABILITÉ ET ROBUSTESSE A L'INCERTITUDE.

Dans cette partie, nous nous concentrons sur les incertitudes sur les scénarios de croissance futurs. Nous replaçons notre réflexion dans le cadre de la recherche d'un compromis international, où les

<sup>21</sup> On pourrait rajouter le total des investissements étrangers à l'aide au développement, mais les transferts simulés restent bien plus importants que le total des flux financiers actuels.

négociateurs doivent, en connaissant les mécanismes des règles, en possédant éventuellement un outil d'évaluation ex ante des coûts totaux des politiques climatiques comme le modèle utilisé dans nos travaux, parvenir au choix d'une règle d'allocation des quotas.

Notre démarche se décompose en trois étapes :

- des comparaisons des résultats fournies par des simulations conjointes des cinq règles d'allocation testées ;
- l'examen des « préférences » de chaque région selon un critère de minimisation des coûts totaux des politiques climatiques, sur le court et le long-terme ;
- la discussion de l'utilisation des règles d'allocation des quotas comme outil de décision et de négociation.

Afin de comparer les différentes règles d'allocation, il est nécessaire de les calibrer sur une base commune. Nous avons choisi comme base commune le budget carbone émis sur la période 2008-2052. Pour cela, nous avons établi deux jeux de paramètres pour chaque règle, correspondant à des budgets respectifs de 300 et 350 gigatonnes de carbone sur la période considérée. Pour la règle de contraction et convergence, cela correspond à deux enveloppes globales d'émissions proposées par GCI, l'une étant la trajectoire de réduction anticipée WG1 et l'autre une trajectoire médiane entre WG1 et la trajectoire retardée WRE. Le tableau suivant regroupe le détail des jeux de paramètres utilisés.

<b>Budget</b>		<b>300 gigatonnes</b>	<b>350 gigatonnes</b>
<b>Grand-fathering</b>	Taux	-5%	-1 %
	Seuil	2100 kg /hab	3000 kg /hab
<b>Allocation par tête</b>	Niveau d'émissions par tête	750 kg /hab	900 kg /hab
<b>Contraction et convergence</b>	Enveloppe	WG1	Mid
	Année de convergence	2030	2030
	Paramètre <i>a</i>	4	4
<b>Jacoby</b>	Seuil	2100 kg /hab	3000 kg /hab
	$\alpha$	0.017	0.010
	$\beta$	0.5	0.3
	$\gamma$	0.01	0.01
<b>Multicritère</b>	Seuil	2100 kg /hab	3000 kg /hab
	Paramètre d'échelle	0.007	0.001
	Jeu de poids	égaux à 1	égaux à 1

Nous avons ensuite pu regrouper et comparer les coûts totaux associés aux 12 régions, aux 5 différentes règles, aux 23 scénarios et aux 8 périodes post-Kyoto. Ceci donne 11 040 informations chiffrées et à partir de celles-là nous avons sélectionné uniquement, pour chaque scénario, chaque région et chaque période, la règle qui maximise le bilan financier des politiques climatiques. Nous obtenons alors des tableaux nous donnant une image des règles préférées (avec ce premier critère du maximum) par chaque région dans chaque scénario futur. Ces tableaux regroupent une quantité importante d'informations, dont nous

tentons de dégager les principaux traits dans les deux parties suivantes. En pratique, la règle d'allocation par tête immédiate est toujours préférée par la majorité des PED, car elle conduit à des transferts très élevés en provenance des pays de l'annexe B. Pour la même raison, elle est jugée assez inacceptable par ces derniers pays. Nous ôtons donc cette règle des résultats présentés dans les paragraphes suivants, en considérant que la règle de Contraction et Convergence met en scène le même principe sous une forme plus acceptable. Les tableaux présentés sont relatifs au premier jeu de paramètres.

#### 4.1. Choix de seconde période : instabilité et hétérogénéité

Dans un premier temps nous observons la règle préférée, selon le critère du maximum exposé ci-dessus, pour la seule période de 2015. Cela revient à imaginer que les négociateurs adoptent un comportement myope sur les étapes suivantes, ou qu'ils pensent pouvoir renégocier à loisir, ou enfin qu'ils ont un taux d'actualisation très élevé qui efface les impacts des périodes suivantes.

Il faut noter que pour les PED, la règle préférée peut être une règle avec seuil, qui leur évite de prendre des engagements à cette période. Cela est le cas lorsque la règle de contraction et convergence conduit à une perte nette : alors les PED préfèrent un bilan nul. Cet exercice nous conduit à plusieurs remarques :

- pour un scénario donné, c'est-à-dire pour une certaine croyance sur l'image du futur, nous trouvons le résultat attendu de l'absence de consensus autour de la règle préférée. Une lecture horizontale du tableau permet de constater l'ampleur des divergences dans les préférences des différentes régions. Si ce résultat ne surprend pas, il y a cependant un point qui mérite d'être mentionné : les éventuels regroupements de régions favorables à telle ou telle règle dépassent la simple opposition habituelle Nord – Sud, et présentent un partage du monde moins évident : les USA se démarquent très nettement du reste de l'annexe B actuelle ; de même l'Amérique latine (LAM) se distingue le plus souvent du reste des pays du tiers monde ; enfin pour beaucoup de scénarios il y a désaccord entre la Chine (CPA) et le reste de l'Asie.

	USA	CANZ	JPN	WEU	EEU	FSU	CPA	SAS	ROA	MENA	SAFR	LAM
Scenarios	MultiCrit	CC	CC	CC	Jacoby	Flatrate	CC	CC	Flatrate	Jacoby	CC	Jacoby
	MultiCrit	CC	CC	CC	Jacoby	Jacoby	CC	CC	Flatrate	Jacoby	CC	Jacoby
	MultiCrit	CC	CC	CC	Jacoby	Flatrate	CC	CC	Flatrate	CC	CC	Jacoby
	MultiCrit	CC	CC	CC	Jacoby	Flatrate	CC	CC	Flatrate	CC	CC	Jacoby
	Flatrate	MultiCrit	CC	CC	Jacoby	Jacoby	CC	CC	CC	CC	CC	Jacoby
	MultiCrit	MultiCrit	CC	CC	Jacoby	Jacoby	CC	CC	CC	MultiCrit	CC	Jacoby
	Flatrate	MultiCrit	CC	CC	Jacoby	Jacoby	CC	CC	CC	CC	CC	Jacoby
	Flatrate	MultiCrit	CC	CC	Jacoby	Flatrate	CC	CC	CC	CC	CC	Jacoby
	Flatrate	MultiCrit	CC	CC	Jacoby	Flatrate	CC	CC	CC	CC	CC	Jacoby
	MultiCrit	CC	CC	CC	Jacoby	Flatrate	CC	CC	CC	CC	CC	Jacoby
	MultiCrit	CC	CC	CC	CC	Jacoby	CC	Flatrate	Flatrate	Jacoby	CC	Jacoby
	MultiCrit	CC	CC	CC	CC	Jacoby	CC	CC	Flatrate	CC	CC	Jacoby
	MultiCrit	CC	CC	CC	Jacoby	Flatrate	CC	CC	CC	CC	CC	Jacoby
	MultiCrit	CC	CC	CC	Jacoby	Flatrate	CC	CC	CC	CC	CC	Jacoby
	MultiCrit	CC	CC	CC	CC	Jacoby	Flatrate	CC	CC	CC	CC	Jacoby
	MultiCrit	CC	CC	CC	CC	Jacoby	Flatrate	CC	CC	CC	CC	Jacoby
	MultiCrit	CC	CC	CC	CC	Jacoby	Flatrate	CC	CC	CC	CC	Jacoby
	MultiCrit	CC	CC	CC	CC	Jacoby	Flatrate	CC	CC	CC	CC	Jacoby
	Flatrate	CC	CC	CC	Jacoby	Jacoby	CC	CC	CC	CC	CC	Jacoby
	Flatrate	CC	CC	MultiCrit	CC	Flatrate	CC	CC	CC	MultiCrit	CC	Jacoby
	Flatrate	CC	CC	CC	Jacoby	Flatrate	CC	CC	CC	CC	CC	Jacoby
	Flatrate	CC	CC	CC	CC	Flatrate	Flatrate	CC	CC	CC	CC	Jacoby
	Flatrate	CC	CC	CC	Jacoby	Jacoby	CC	CC	Flatrate	Jacoby	CC	Jacoby
	Flatrate	CC	CC	CC	Jacoby	Jacoby	CC	CC	CC	Jacoby	CC	Jacoby

Tableau 4 : préférences de court-terme selon les scénarios et les régions<sup>22</sup>

<sup>22</sup> CC= contraction & convergence ; MultiCrit = règle multicritères ; Flatrate = grandfathering non-différencié

- une lecture verticale du tableau fait apparaître que, pour un pays donné, le choix d'une règle préférée est instable, sensible au changement de scénario. Le Japon et l'Afrique ont des préférences très robustes, de même que la Chine et l'Europe à un degré moindre. La région de l'ex-URSS est partagée entre deux règles : la règle de réduction uniforme ou la règle de Jacoby., mais dans les deux cas, la Russie est dans la majorité des scénarios très proche du seuil fixé à 2100 \$ par tête. Il faut donc interpréter le choix d'un taux uniforme (Flatrate) comme un choix de rester en dehors (dans ce cas Jacoby et Flatrate sont indifférenciés, puisqu'ils fonctionnent avec le même seuil), tandis que, dans les scénarios où la région FSU franchit le seuil, la règle de Jacoby est préférée parce qu'elle inclut une tolérance de croissance contrôlée des émissions pour des revenus par tête juste au-dessus du seuil.

	USA	CANZ	JPN	WEU	EEU	FSU	CPA	SAS	ROA	MENA	SAFR	LAM	
<b>Scenarios</b>	MultiCrit	CC	CC	CC	Jacoby	Flatrate	CC	CC	Flatrate	Jacoby	CC	Jacoby	
	MultiCrit	CC	CC	CC	Jacoby	Jacoby	CC	CC	Flatrate	Jacoby	CC	Jacoby	
	MultiCrit	CC	CC	CC	Jacoby	Flatrate	CC	CC	Flatrate	CC	CC	Jacoby	
	MultiCrit	CC	CC	CC	Jacoby	Flatrate	CC	CC	Flatrate	CC	CC	Jacoby	
	Flatrate	MultiCrit	CC	CC	Jacoby	Jacoby	CC	CC	CC	CC	CC	Jacoby	
	MultiCrit	MultiCrit	CC	CC	Jacoby	Jacoby	CC	CC	CC	MultiCrit	CC	Jacoby	
	Flatrate	MultiCrit	CC	CC	Jacoby	Jacoby	CC	CC	CC	CC	CC	Jacoby	
	Flatrate	MultiCrit	CC	CC	Jacoby	Flatrate	CC	CC	CC	CC	CC	Jacoby	
	Flatrate	MultiCrit	CC	CC	Jacoby	Flatrate	CC	CC	CC	CC	CC	Jacoby	
	MultiCrit	CC	CC	CC	Jacoby	Flatrate	CC	CC	CC	CC	CC	Jacoby	
	MultiCrit	CC	CC	CC	CC	Jacoby	CC	Flatrate	Flatrate	Jacoby	CC	Jacoby	
	MultiCrit	CC	CC	CC	CC	Jacoby	Jacoby	CC	CC	Flatrate	CC	Jacoby	
	MultiCrit	CC	CC	CC	CC	Jacoby	Flatrate	CC	CC	CC	CC	Jacoby	
	MultiCrit	CC	CC	CC	CC	Jacoby	Flatrate	CC	CC	CC	CC	Jacoby	
	MultiCrit	CC	CC	CC	CC	Jacoby	Flatrate	CC	CC	CC	CC	Jacoby	
	Flatrate	CC	CC	CC	Jacoby	Jacoby	Jacoby	CC	CC	CC	CC	Jacoby	
	Flatrate	CC	CC	MultiCrit	CC	CC	Flatrate	CC	CC	CC	MultiCrit	CC	Jacoby
	Flatrate	CC	CC	CC	Jacoby	Jacoby	Flatrate	CC	CC	CC	CC	CC	Jacoby
	Flatrate	CC	CC	CC	CC	CC	Flatrate	Flatrate	CC	CC	CC	CC	Jacoby
	Flatrate	CC	CC	CC	Jacoby	Jacoby	Jacoby	CC	CC	Flatrate	Jacoby	CC	Jacoby
Flatrate	CC	CC	CC	Jacoby	Jacoby	Jacoby	CC	CC	CC	Jacoby	CC	Jacoby	

**Tableau 5 : robustesse des choix de règles à l'incertitude**

Certaines nuances doivent être apportées dans la lecture de ces résultats.

Premièrement, ces tableaux ne font apparaître que les règles préférées, et ne donne aucune indication sur l'écart entre la première et la seconde règle dans l'ordre de préférence. Si la seconde règle était en général nettement plus désavantageuse pour chaque région, alors les résultats de ce tableau seraient solides. Mais ce n'est pas toujours le cas. Parfois la non robustesse du choix de certaines régions à l'incertitude relève en fait de la grande proximité des résultats donnés par deux règles différentes, qui apparaissent dans une même colonne, c'est souvent le cas pour les trois règles de grandfathering (flatrate, multicritères, Jacoby), comme en témoigne les exemples de FSU et USA. Dans ces cas là, le tableau a tendance à surestimer la fragilité des choix que c'est effectivement le cas. Néanmoins dans le cas de certaines régions apparaissent des divergences importantes, comme pour Canada-Nouvelle Zélande (CANZ) et l'Europe de l'Est (EEU).

Deuxièmement, le niveau d'agrégation régionale adopté peut masquer des disparités intra-régionales assez importantes. Cet effet d'agrégation, mentionné par [Reiner et Jacoby, 1997], peut rendre parfois les préférences régionales difficiles à interpréter au vu de tel ou tel pays particulier au sein d'une de nos grandes régions. Mais nous ne pouvons dire a priori dans quel sens cet effet joue en général, s'il s'agit plutôt d'une plus grande robustesse ou d'un facteur de divergence. Dans l'ensemble, la relative robustesse de ces résultats aux scénarios est un résultat intéressant en soi.

#### 4.2. Prise en compte du long-terme : choix évolutifs et renégociation

Supposons maintenant que les pays intègrent de façon primordiale les effets d'irréversibilité d'un premier engagement sur une règle d'allocation et prennent donc en compte l'ensemble des périodes suivantes jusqu'en 2050, à cause des difficultés attendues de toute re-négociation. Nous procédons à une analyse du même genre, à ceci près que nous examinons la règle préférée non plus en fonction du seul bilan net de la période 2012-2017 mais en fonction de la somme actualisée des bilans nets des huit périodes consécutives à celle du protocole de Kyoto<sup>23</sup>. Dans un cadre de négociation ou la renégociation est présentée d'emblée comme difficile, les négociateurs prennent en compte l'ensemble des périodes concernées par le régime contraignant (ici jusqu'en 2050 seulement). Ce changement de perspective a deux implications :

- pour un scénario donné, les regroupements possibles de régions selon leurs préférences changent
- pour une région donnée, la robustesse du choix d'une règle préférée est modifiée aussi. Ainsi l'Europe de l'Ouest et le Japon, qui préféreraient de façon univoque la règle de contraction et convergence en 2012, parce qu'elle garantissait la présence des PED avec leurs opportunités de réduction à bas coûts, sont cette fois-ci partagés entre cette règle C&C et l'approche multicritère. Quant à la région FSU, elle préfère cette fois clairement la règle de Jacoby qui allège son taux de réduction par rapport aux autres règles de grandfathering.

	USA	CANz	JPN	WEU	EEU	FSU	CPA	SAS	ROA	MENA	SAFR	LAM
Scenarios	Flatrate	CC	MultiCrit	MultiCrit	Jacoby	Jacoby	Jacoby	CC	CC	CC	CC	CC
	Flatrate	CC	MultiCrit	MultiCrit	Jacoby	Jacoby	Jacoby	CC	CC	CC	CC	CC
	Flatrate	CC	MultiCrit	MultiCrit	Jacoby	Jacoby	Jacoby	CC	CC	CC	CC	CC
	MultiCrit	CC	MultiCrit	MultiCrit	Jacoby	Jacoby	Jacoby	CC	CC	CC	CC	CC
	Flatrate	MultiCrit	MultiCrit	MultiCrit	Jacoby	Jacoby	Jacoby	CC	CC	CC	CC	CC
	Flatrate	MultiCrit	MultiCrit	MultiCrit	MultiCrit	Jacoby	Jacoby	CC	CC	CC	CC	CC
	Flatrate	MultiCrit	MultiCrit	CC	Jacoby	Jacoby	Jacoby	CC	CC	CC	CC	CC
	MultiCrit	MultiCrit	CC	CC	Jacoby	Jacoby	CC	CC	CC	CC	CC	CC
	Flatrate	MultiCrit	MultiCrit	CC	Jacoby	Jacoby	Jacoby	CC	CC	CC	CC	CC
	Flatrate	MultiCrit	MultiCrit	MultiCrit	Jacoby	Jacoby	Jacoby	CC	CC	CC	CC	CC
	MultiCrit	CC	CC	CC	Jacoby	Jacoby	Jacoby	CC	CC	CC	CC	CC
	Flatrate	MultiCrit	MultiCrit	MultiCrit	Jacoby	Jacoby	Jacoby	CC	CC	CC	CC	CC
	MultiCrit	CC	CC	CC	Jacoby	Jacoby	Jacoby	CC	CC	CC	CC	Jacoby
	MultiCrit	CC	CC	CC	Jacoby	Jacoby	Jacoby	CC	CC	CC	CC	Jacoby
	Flatrate	CC	CC	CC	Jacoby	Jacoby	Jacoby	CC	CC	CC	CC	CC
	MultiCrit	CC	CC	CC	Jacoby	Jacoby	Jacoby	CC	CC	CC	CC	CC
	Flatrate	CC	CC	MultiCrit	Jacoby	Jacoby	Jacoby	CC	CC	CC	CC	CC
	Flatrate	MultiCrit	MultiCrit	MultiCrit	Jacoby	Jacoby	Jacoby	CC	CC	CC	CC	CC
	Flatrate	CC	CC	CC	Jacoby	Jacoby	Jacoby	CC	Jacoby	CC	CC	Jacoby
	Flatrate	CC	CC	CC	CC	Jacoby	Jacoby	CC	CC	CC	CC	Jacoby
Flatrate	CC	CC	MultiCrit	Jacoby	Jacoby	Jacoby	CC	CC	CC	CC	CC	
Flatrate	CC	CC	MultiCrit	Jacoby	Jacoby	Jacoby	CC	CC	CC	CC	CC	

**Tableau 6 : robustesse des choix sur le long-terme**

Il est important de noter ici un fait marquant pour la règle Contraction et Convergence : à court-terme, celle-ci est intéressante pour les pays industrialisés car elle permet d'élargir le marché à des pays pouvant fournir des quotas à un prix plus faible, mais à long-terme, le poids des transferts impliqués par la convergence des quotas alloués par tête vient contrebalancer le gain de court-terme et peser lourd dans le

<sup>23</sup> Le taux d'actualisation est prix uniformément égal à 5%. Des tests avec des taux différenciés selon les régions, en fonction des taux de croissance prévus dans les scénarios, ne donnent pas des résultats nettement différents.

fardeau imposé aux pays industrialisés. En contrepartie bien sûr, les PED y trouvent un intérêt très net sur le long-terme.

Plus généralement, ce regard de long-terme soulève la question politique de la renégociation séquentielle des règles du jeu. Ce débat est paradoxal car d'une part il semble intéressant pour les acteurs économiques de disposer d'une visibilité de long terme sur le régime de coordination et sur les contraintes futures, d'autre part les acteurs voudront probablement renégocier car leurs préférences ne sont pas les mêmes pour le court et le long terme. Le problème de la renégociation est d'ailleurs épineux pour au moins deux raisons :

- l'effet de lock-in du partage de la rente du marché de carbone. C'est à dire que les régions (nous pensons particulièrement à FSU et l'Asie) qui ont bénéficié d'un régime sous lequel elles récoltaient une rente importante du fait de leurs importantes dotations en permis *et* de leurs coûts d'abattement très faibles, seront probablement réticentes à se voir dépouillées de cette rente par un autre régime d'allocation.
- si la première (ou les premières) période(s) de coordination par les quantités révèle(nt) les coûts réels pour chaque région, permet d'évaluer précisément les transferts effectués et que ceux-ci s'avèrent très élevés comme certaines simulations peuvent le laisser penser, alors il est peu probable que les régions acceptent de pérenniser des règles qui les obligent à des transferts trop élevés. La renégociation paraît inévitable dans ce cas. Pour (Victor, 2000), la coordination par les quantités pourrait même être condamnée en raison même de cette révélation des coûts et des transferts.

## 5. VERS DES INSTRUMENTS HYBRIDES POUR SE PRÉMUNIR CONTRE L'INCERTITUDE

A travers les analyses ci-dessus, comme dans les arguments avancés par les États-Unis dans leur refus de Kyoto, il apparaît clair que l'incertitude qui pèse sur les coûts des politiques climatiques est un obstacle majeur à l'adoption de stratégies limitant efficacement le changement climatique.

Si l'on retourne à la littérature économique, le choix d'un instrument en fonction de l'incertitude sur les coûts a fait l'objet d'un traitement largement connu par (Weitzman, 1974). Celui-ci démontre qu'un instrument de régulation par les prix limite plus (en espérance) les pertes dues à l'incertitude sur les coûts qu'un instrument quantités, lorsque la courbe de dommage marginal est moins pentue que celle du coût marginal de réduction. Cet argument théorique qui au premier ordre peut correspondre au cas de la régulation des émissions de GES, est complété par des études plus récentes, qui l'adaptent à la nature d'externalité de *stock* du changement climatique et étudient sa validité en cas de risques de dommages catastrophiques (Newell et Pizer, 2000, Pizer, 1997). Les conclusions mettent en évidence, dans la plupart des cas, l'avantage à court-terme de l'instrument prix. L'intuition est simple : l'instrument prix résout l'incertitude sur les prix du carbone mais laisse le résultat environnemental incertain, ce qui importe moins sur le court-terme (peu de dommages supplémentaires) qu'une erreur sur la facture des réductions obtenue pour une quantité d'émissions fixe et parfaitement respectée. Néanmoins, comme nous l'avons citée, la clarté de l'argument théorique se heurte à des difficultés d'acceptabilité politique d'une taxe qui porterait principalement sur l'énergie au sein des pays, et aussi d'un système de taxation international.

Dès lors, prenant acte de cette difficulté politique, les regards se sont tournés vers les possibles adaptations du système de permis négociables qui pourraient permettre de limiter l'incertitude sur les coûts *ex post*, et surtout à limiter la possibilité de coûts beaucoup plus élevés que prévu, ou plus élevés que

ce qui semble économiquement acceptable. Après l'échec de la proposition de la *safety valve* lors des négociations autour du protocole de Kyoto<sup>24</sup>, des propositions variées ont émergé. L'Agence Internationale de l'Énergie a mené une série de travaux et de communications reprenant les principales propositions (AIE, 2002 ; Philibert et Pershing, 2001). Nous reprenons ici la description de ces options hybrides :

**Un prix plafond** permettrait de limiter la hausse du prix du carbone sur le marché des quotas d'émissions en assurant institutionnellement la mise sur marché d'une quantité non-limitée de quotas additionnels à l'allocation initiale à ce prix plafond. Lorsqu'il devient effectif parce que le prix des quotas atteint le niveau du plafond, ce mécanisme induit une « fuite » d'émissions par rapport à l'objectif quantitatif initial. Mais cette fuite peut alors être justifiée (i) par le caractère non-acceptable d'un coût plus élevé, qui menacerait le système de régulation lui-même et pourrait conduire un grand nombre d'agents en situation de non-observance, (ii) par la possibilité de dépassement temporaire d'une trajectoire de stabilisation donnée, sous réserve de réduire plus sévèrement ensuite, si les coûts élevés sont liés à une *transition* technologique, (iii) par un raisonnement de type coûts-bénéfices : si les coûts sont plus élevés, ils ne sont justifiés que pour des dommages plus élevés, et donc il est logique de relâcher la pression sur les émissions. Par ailleurs il est possible de fixer a priori des objectifs quantitatifs plus ambitieux, accompagnés d'un prix-plafond, que dans un système sans « sécurité », où la crainte de coûts élevés peut pousser les Parties à limiter la contrainte future au maximum. Le réajustement du niveau-plafond est ensuite possible à chaque renégociation. Enfin, lorsque le mécanisme devient effectif, l'achat de permis additionnels au prix plafond dégage des ressources financières qui peuvent être recyclées de diverses manières, pouvant accroître l'efficacité du système : financement de R&D ciblée, fonds d'adaptation, etc.

**Des engagements non-contraignants** pour les pays en développement consisteraient à négocier pour ces pays des objectifs d'émissions, sensiblement inférieurs à leurs trajectoires de référence possibles. Si ces pays ne parviennent pas à satisfaire ces objectifs, ils ne sont pas pénalisés pour leur non-observance et aucun achat de quotas supplémentaires ne sera exigé pour corriger leur situation. Par contre si ces pays mènent une politique de réduction des émissions qui conduit à un niveau d'émissions inférieur à l'objectif, les quotas ainsi dégagés pourraient être vendus sur le marché international, dégageant ainsi des ressources potentielles. Si les coûts de réduction dans certains PED sont assez faibles par rapport à un prix de marché international élevé, ce mécanisme peut représenter une incitation sans risque pour les pays non-contraints à effectuer des réductions domestiques. Un des problèmes reste de fixer le niveau de l'objectif. Si cet objectif est au milieu de l'intervalle d'incertitude des trajectoires de développement sans politiques de réduction, on court le risque de donner à ces pays des quantités importantes d'*air chaud* (en cas de réalisation de la trajectoire *basse* ). Si l'objectif est trop bas, l'incitation à réduire diminue, parce qu'avant de pouvoir vendre des quotas, le pays concerné devra financer sur ses propres ressources les réductions nécessaires pour atteindre l'objectif. Il faudra alors que les gains dégagés par les réductions suivantes soient suffisants pour compenser les premières réductions non compensés par des quotas à vendre.

**Des objectifs dynamiques** exprimés en termes relatifs par rapport à la croissance réelle présentent l'attrait de ne plus représenter explicitement des contraintes *absolues* sur la croissance ou le développement. L'attrait de ce type de proposition, exprimé en intensité énergétique du PIB en général, est certain, bien qu'il pose quelques problèmes. Premièrement, il soulève des questions de mise en place et de négociation, du fait que la quantité de quotas allouées ne devient connue que lorsque la croissance

---

<sup>24</sup> Voir (Hourcade et al., ) pour un historique des malentendus autour de cette proposition de prix-plafond.



réelle l'est aussi. L'impact sur le marché des quotas d'une mauvaise estimation de la croissance réelle d'un pays important (pensons à la Chine par exemple) sur la quantité d'offre ou de demande de quotas sur le marché peut être considérable et induire des instabilités répétées qui pose problème. Deuxièmement, il n'est pas certain *a priori* que la négociation d'objectifs quantitatifs permette de limiter l'incertitude sur les coûts. Au-delà du problème d'instabilité du marché mentionné, le passage d'objectifs exprimés en intensité énergétique à une évaluation des coûts finaux n'est pas plus simple ou plus direct que la difficile conversion d'une règle d'allocation ad hoc en coûts. D'ailleurs cette proposition d'objectifs dynamiques est à rapprocher des règles multicritères et de la règle de H. Jacoby, qui font dépendre les quotas alloués de la croissance réelle des régions, avec une gradation de l'effort demandé en fonction du revenu par tête par exemple.

Au total, l'ensemble de ces éléments analysés cette fois-ci non plus du strict point de vue de la maîtrise des incertitudes mais du point de vue de la renégociation, revient plus en pratique à limiter les ordres de grandeur en jeu sans pour autant supprimer, d'un point de vue qualitatif, le jeu des règles sur la pondération du partage du fardeau. Mais bien sûr, cela ne peut se faire qu'au prix d'un plus grand laxisme sur l'objectif environnemental. Ceci ne condamne pas l'approche dans la mesure où l'absence de telles soupapes de sécurité pourraient conduire à l'illusion d'une intégrité environnementale et, en fait, à l'éclatement rapide des accords. Simplement, ceci montre que on ne peut résoudre le problème de l'allocation uniquement par ces aménagements de « sécurité » du système, même si, par nature, ils sont faits pour renforcer l'acceptabilité du système en minimisant les risques économiques.

## 6. LIMITES DE L'ANALYSE : LA NON-PRISE EN COMPTE DES DOMMAGES FUTURS

Nous n'avons examiné jusque là que la répartition du fardeau des *politiques de réduction* coordonnées pour atteindre un objectif commun de stabilisation du climat. Pourtant il est probable que le débat autour d'un régime futur acceptable et efficace sera confronté à la question des dommages du climat et devra l'intégrer dans une réflexion plus large sur la facture « globale » due au climat. Un retour sur la question de l'équité et sur les principes pragmatiques dégagés à la fin du premier chapitre et qui semblent incontournables nous contraint de prendre en compte les dommages dans la prise en compte des capacités de financer des actions pour le climat, des responsabilités différenciées dans les dommages et des besoins de développement. En particulier la réflexion sera orientée dans deux directions conjointes :

- une partie des dommages futurs sont devenus inévitables compte-tenu de l'évolution en cours du climat et de l'inertie de la chaîne émissions – concentrations – forçage radiatif – climat. Le principe de responsabilité inscrit dans la convention de Rio exige alors d'examiner la possibilité de **compensations** de ces dommages par la collectivité mondiale, selon des responsabilités *communes mais différenciées*. D'un point de vue d'économie publique, la nécessité de compensations renvoie à la question des droits de propriété sur l'atmosphère. Mais la situation est rendue très complexe par l'asymétrie entre la pollution (une tonne émise se dilue de la même façon dans l'atmosphère quelle que soit son origine) et les dommages subis (très différents selon les régions). Schématiquement si les droits sur l'atmosphère sont attribués à un pays très peu émetteur et sujet à de forts dommages (Afrique sub-saharienne par exemple), alors les pays émetteurs devront à la fois financer les réductions et compenser le premier pays des dommages résiduels. Au contraire si on part des droits acquis par les émissions passées, les pays peu émetteurs mais sujets à de forts dommages devraient compenser les pays possédant les droits s'ils désirent de leur part des politiques de réductions des émissions jusqu'au niveau de coût marginal qui égalise leur dommage marginal. Ce schéma extrême montre la difficulté du débat : la nature de bien public et l'absence de droits sur l'atmosphère ne permet pas de trancher cette question de cette manière. La boîte à outils de l'économie

publique nous donne alors des moyens de calculer la production optimale de bien public (cf. chapitre suivant) qui peut apporter des éléments de réponses éclairants, en adaptant le cadre standard de la règle Bowen-Lindhal-Samuelson au cas du changement climatique.

- les risques de dommages suscitent **une réflexion sur l'adaptation** au changement climatique, et très souvent le problème est posé en termes d'arbitrage entre réduction des émissions et adaptation. Cette vision témoigne, de même que la séparabilité équité-efficacité, d'un raisonnement simplificateur. En effet les politiques de réduction des émissions et les actions d'adaptation touchent un certain nombre d'activités humaines ou de choix publics identiques : la localisation des activités, le développement agricole, les choix énergétiques, etc. Les actions entreprises pour la réduction des émissions ou l'adaptation peuvent être en synergie ou antagonistes (on cite par exemple le cas d'une extension du réseau hydroélectrique, qui permet de réduire les émissions du secteur électrique mais rend la production plus vulnérable aux évolutions des précipitations).

Pour l'instant, la question d'un partage du fardeau « global » n'a pu être décliné en propositions concrètes, si ce n'est le pas minimale que représente la création d'un fonds d'adaptation destiné à tenter de limiter certains dommages dans les pays les plus affectés. Cette absence du débat s'explique par plusieurs controverses ou difficultés scientifiques et politiques :

- **les évaluations existantes** sur les dommages potentiels ne sont pas capables de fournir un référentiel fiable pour le fardeau futur des pays les plus touchés. De larges incertitudes pèsent sur l'évolution détaillée du climat et sur les vecteurs de dommages : événements extrêmes, succession rapprochée d'extrema de température ou de précipitations par exemple. Ces incertitudes deviennent plus larges au fur et à mesure que l'on cherche à régionaliser les impacts climatiques et les dommages socio-économiques (Ambrosi, 2004)

- **la prise en compte des dommages dans un calcul économique** est un exercice compliqué par différents effets non-négligeables : les effets de propagation des chocs dans les économies des régions touchées et dans le reste du monde, la prise en compte des différences de vulnérabilité, vis-à-vis des besoins de base et des capacités d'adaptation à court-terme, l'intégration du risque dans l'évaluation, via un calcul de primes de risque différenciées selon les régions et les tranches de population. Sur ce dernier point, nous avons mené un exercice d'évaluation des primes de risque régionalisées et différenciées par déciles de population pour estimer les erreurs pouvant être commises lorsque les primes de risque ne sont pas prises en compte<sup>25</sup>. Il apparaît nettement qu'un raffinement de la désagrégation et du calcul des primes de risque ne change pas significativement le schéma de répartition des risques de dommages, bien qu'il conduise à une ré-évaluation à la hausse des dommages potentiels sur les populations pauvres des régions très touchées (Wendling, 2004, Ambrosi, 2004).

- le **tempo des dépenses** de réduction d'émissions et celles dues aux dommages climatiques ne correspondent pas : le fardeau des premières périodes d'engagement porte principalement sur les coûts d'abattement – pour lesquels des coûts élevés sont en partie dus à la nécessité d'une transition accélérée vers une économie sans carbone – tandis que celui des périodes lointaines portera plus sur les dommages. A cause des difficultés d'intégrer le long-terme dans la négociation des périodes d'engagement proches, que ce soit à cause des questions d'actualisation ou de fortes incertitudes sur l'avenir, il est donc envisageable que la question des dommages climatiques pourra rester isolée de la question de la répartition des efforts pendant quelques périodes d'engagement encore.

---

<sup>25</sup> L'intuition derrière cet exercice est que la prise en compte de primes de risque très élevées pour les populations pauvres et très vulnérables pourrait être un argument d'action précoce et plus déterminée dans les opérations de réduction des émissions ou dans le calcul des compensations.

Cependant, dès que les engagements seront réellement contraignants et susceptibles d'engendrer des coûts significatifs, la question du niveau global d'engagement et de la distribution géographique des efforts ne pourra s'abstraire de la prise en considération des dommages eux-mêmes, fût-ce de façon très grossière ou implicite. En fait on ne pourra éviter de faire remonter les dommages potentiels parmi les paramètres du choix des règles de coordination. Or dans un mode de pensée qui vise uniquement à distribuer une richesse rare, à savoir les droits d'émettre dans l'atmosphère, les dommages sont exclus du débat. Il faudra revenir à un point de vue conséquentialiste, qui se préoccupe surtout de la perte de bien-être finale subie « à cause du climat », tant par les efforts de réduction que par les dommages. Ajouter la facture due aux dommages à celle due au partage du fardeau des abattements dans l'analyse que nous avons effectuée dans la partie 4 de ce chapitre ne change donc pas les préférences régionales pour telle ou telle règle. Cela consisterait uniquement à déplacer le curseur de la facture totale d'un montant égal aux dommages attendus, de la même façon pour toutes les règles car elles correspondent toutes, à peu d'émissions près, au même budget carbone sur 45 ans et donc sensiblement aux mêmes dommages. Par contre, comme nous allons le montrer dans les chapitres suivants, l'examen des règles de répartition du fardeau total, incluant dommages et dépenses d'abattement dans les pertes d'utilité potentielles, peut considérablement changer la vision de l'équité que l'on a sur les règles d'allocation des quotas.



### CHAPITRE 3

#### DOMMAGES ET PARTAGE DE LA « FACTURE CLIMATIQUE » TOTALE : RÔLE DES RÈGLES DE GOUVERNANCE MONDIALE ET DE SOLIDARITÉ INTERGÉNÉRATIONNELLE

---

Comme nous l'avons rappelé au premier chapitre de ce rapport, les argumentaires développés au cours des négociations visant à coordonner la limitation du changement climatique puisent principalement dans le registre rhétorique de l'équité, ainsi que dans l'évocation de contraintes de politique interne. Certains observateurs ont souligné la réticence des négociateurs à placer le débat sur une discussion économique, laissant la porte ouverte à des manœuvres politiques moins encadrées (Bodansky, 2001, Hourcade, 2000). Pourtant l'économie publique théorique n'est pas sans intérêt pour dénouer les fils du problème de la coordination. On peut sans conteste considérer qu'un climat stable sur le long-terme est un bien public global dont les Parties doivent se répartir la production, à la fois dans l'espace (distribution intra-générationnelle) et dans le temps (distribution inter-générationnelle). Dans la littérature économique, la question de la production optimale de bien public est rattachée aux conditions de Bowen-Lindhal-Samuelson (BLS, voir encadré), dans un cadre statique ou étendue à un cadre intergénérationnel (Sandler et Smith, 1976). Les négociations passées ont évolué loin de ce type de considérations, notamment à cause des économistes eux-mêmes, et de leur réflexe déjà évoqué d'isoler équité et efficacité économique.

Le travail mené dans ce chapitre part du constat opposé : les méthodes et outils usuels de l'économie peuvent apporter un éclairage utile sur les nécessaires considérations éthiques auxquelles nous devons faire face<sup>26</sup>, notamment pour la question du climat. Après l'analyse positive de simulations sous incertitude réalisée au chapitre 2, nous reprenons un point de vue normatif. Nous adoptons la métaphore du « planificateur bienveillant », qui peut constituer une illustration du rôle du président de la Conférence des Parties, dans la mesure où celui-ci doit généralement formuler une proposition « à prendre ou à laisser » à l'issue des discussions avant que les négociations soient closes (Grubb et al. , 1999). Nous supposons ensuite que ce planificateur bienveillant est mandaté pour deux périodes successives, ce qui nous permet d'aborder la question inter-générationnelle tout en la schématisant. Pour illustrer les différentes visions possibles de la coordination internationale, nous distinguons ensuite quatre types de mandats, selon :

- **les règles de la diplomatie** : priorité peut être donnée au *statu quo*, selon lequel c'est la répartition des pouvoirs actuels qui importe pour formuler les règles du long-terme, ou bien on peut envisager une approche *adaptive* selon laquelle la décision prendra en compte les évolutions des rapports de force internationaux sur le long-terme ;

- **les visions de l'équité inter-générationnelle** face aux risques de dommages climatiques : schématiquement les Parties peuvent se soucier uniquement des risques encourus par leurs propres « descendants », ce que nous appellerons une *solidarité dynastique*, ou bien prendre en compte le bien-être de tous les individus sans distinction de nationalité, selon une *solidarité universelle*.

Pour les quatre mandats obtenus en croisant les deux alternatives ci-dessus, nous analysons les implications en termes de partage du fardeau dans la production optimale du bien public climat, et nous discutons le réalisme politique de tels schémas de répartition. Cela nous permettra ensuite d'en tirer des éclairages utiles sur les difficultés liées à l'incertitude et sur les pré-requis éthiques d'un régime climatique en situation d'inégalité forte des pays.

---

<sup>26</sup> Cf. (A. Sen , 1987, p.9) : « there is something in the methods standardly uses in economics, related inter alia with its engineering aspect, that can be use to modern ethics as well ».

## 1. PRÉSENTATION DU CADRE ANALYTIQUE

Nous repartons ici du cadre du modèle standard développé par (Sandler and Smith, 1976). Dans un monde à  $N$  régions, nous considérons deux périodes de temps, symbolisant le présent et le futur (les variables concernant le futur étant notées par un exposant « f »).

Dans chaque région  $i$ , un individu représentatif pris dans la population  $l_i$  répartit son revenu courant entre sa consommation  $c_i$  et ses dépenses de réduction des émissions  $a_i$  :

$$y_i = c_i + a_i$$

NB : Cette équation est relative à des variables par tête : pour obtenir l'équilibre budgétaire de la région  $i$  entière, il faudra multiplier tous ces termes par  $l_i$ .

Les quantités mondiales de réductions des émissions pour les deux périodes sont respectivement notées  $x$  et  $x^f$ , étant de manière usuelle mesurées par rapport au scénario de référence. La somme cumulée des émissions impliquent des dommages en seconde période, répartis sur les différentes régions. Pour plus de simplicité, nous supposons que ces dommages régionalisés sont directement liés au cumul des réductions sur les deux périodes, selon des fonctions décroissantes  $d_i(x+x^f)$ . Cela permet d'écrire le budget de seconde période pour chaque région :

$$y_i^f - d_i(x + x^f) = c_i^f + a_i^f$$

Enfin, nous faisons l'hypothèse d'une coordination efficace des actions de réductions, par exemple via un marché concurrentiel de quotas ou une taxe uniforme, ce qui nous permet d'agréger de manière univoque les courbes de coûts individuelles en une unique courbe de coût mondiale pour chaque période (cela correspond en fait à une somme « horizontale » des courbes de coût marginal de réduction). En notons  $C(x)$  et  $C^f(x^f)$  les deux courbes agrégées, nous pouvons écrire la relation suivante pour chaque période:

$$\sum_i l_i \cdot a_i = C(x)$$
$$\sum_i l_i^f \cdot a_i^f = C^f(x^f)$$

Nous nous plaçons dans une perspective où le planificateur bienveillant doit proposer à la Conférence des Parties (COP) une répartition des abattements pour les deux périodes. Si cette hypothèse va quelque peu à l'encontre de la réalité séquentielle des négociations actuelles menées par pas de 5 ans, il faut la replacer dans la nécessité future d'ancrer le régime de coordination dans une dynamique de long-terme, pour tenter de fournir aux agents économiques un contexte de décision stabilisé. On interprétera alors l'attribution des abattements à réaliser dans la seconde période plutôt comme un avant-projet qui sera ou ne sera pas acceptable *in fine*, mais fait déjà partie de la proposition mise sur la table des négociations. Pour avoir quelque chance de réussite des négociations, nous supposons que le planificateur fonde sa proposition sur la maximisation d'une fonction de bien-être collectif, décrite comme une somme pondérée des utilités individuelles des individus représentatifs. Les poids dépendent alors du mandat donné au planificateur, selon les règles de la diplomatie en vigueur.

Malgré son caractère très contestable sur le plan de l'équité, nous formulons aussi l'hypothèse que les pays les plus développés profitent de leur position dominante pour imposer une exigence de non-redistribution : les politiques climatiques ne doivent pas donner lieu à une redistribution significative des

revenus des pays développés vers les pays en développement. Ceci implique deux conditions sur la fonction de bien-être collectif :

- les réductions d'émissions régionales ne doivent pas être négatives, c'est-à-dire qu'il n'est pas acceptable de durcir les efforts exigés par certaines Parties pour compenser une attribution d'air chaud à une autre Partie. (i.e.  $a_i < 0$  pour les deux périodes)

- la distribution initiale de la richesse est censée être optimale du point de vue de la maximisation d'utilité. Ceci implique une contrainte sur la pondération des utilités régionales dans la fonction de bien-être collective. Suivant (Negishi, 1960), le jeu de poids convenable est unique, à une constante d'échelle près, et chacun se voit attribué un poids égal à l'inverse de l'utilité marginale de son revenu de référence<sup>27</sup>.

Néanmoins il reste une large marge de manœuvre pour le choix d'une fonction de bien-être collective intertemporelle, selon les différentes interprétations de la clause de non-redistribution en seconde période et selon l'attitude vis-à-vis des dommages climatiques.

En ce qui concerne la clause de non-redistribution de la richesse, les modélisateurs considèrent habituellement qu'elle s'applique séparément pour chaque période (Nordhaus et Yang, 1996). Les poids « de Negishi » varient alors dans le temps de telle sorte que les revenus projetés en seconde période correspondent aussi à un maximum de bien-être collectif. Cette façon d'opérer pose problème, car elle revient à formuler une hypothèse forte sur la configuration politique des négociations, à savoir que les Parties sont d'accord pour anticiper dans la décision multi-périodes les changements futurs de distribution des revenus entre nations. Mais supposer ainsi qu'il peut y avoir consensus sur la légitimité ou l'inéluctabilité des changements de rapports de force économiques semble aller à l'encontre des pratiques courantes de la diplomatie, qui s'appuient uniquement sur les rapports existants. Au contraire, il est probable que les états possédant une influence majeure sur les négociations ne verront pas d'un bon œil leur pouvoir décliner au profit d'une autre Partie et chercheront plutôt à conserver leur position le plus longtemps possible. Cela se traduit dans notre modèle stylisé par une préférence pour le statu quo et la conservation des poids initiaux dans la fonction de bien-être collective.

En ce qui concerne les dommages climatiques, deux attitudes « polaires » peuvent être mentionnées. La première relève de la préservation des intérêts nationaux, autrement dit chaque négociateur défend les citoyens présents et futurs (à naître) du pays qu'il représente, et suit donc une solidarité dynastique. La seconde attitude, proche de ce que défendent de nombreuses ONG, repose sur une solidarité universelle envers les « citoyens du monde », i.e. une prise en compte par chacun de tous les dommages, quelle que soit la population qui les subit. Ces deux hypothèses impliquent dans notre modèle que les utilités de seconde période dépendent ou non des dommages subis par les autres régions.

En combinant ces deux jeux de deux hypothèses, nous obtenons 4 types de mandats possibles, se traduisant par 4 fonctions de bien-être à maximiser. En notant  $U_i$  (resp.  $U_i^f$ ) les utilités des individus représentatifs,  $(\alpha_i)$  et  $(\beta_i)$  les jeux de poids correspondants aux deux périodes successives et  $\varphi$  le taux d'actualisation de l'utilité, nous obtenons les 4 configurations suivantes :

**- Solidarité dynastique et statu quo géopolitique :**

$$W = \sum_i l_i \cdot \alpha_i \cdot U_i(c_i) + \varphi \cdot \sum_i l_i^f \cdot \alpha_i \cdot U_i^f(c_i^f)$$

---

<sup>27</sup> A titre d'illustration, si ces poids sont tous égaux à 1, l'optimum est atteint pour une égalisation des revenus par tête.

$$\text{avec } \alpha_i = \frac{\alpha}{U'_i(y_i)} \quad \text{et } \alpha = \left( \sum_i \frac{l_i}{U'_i(y_i)} \right)^{-1}$$

- Solidarité dynastique et adaptation géopolitique :

$$W = \sum_i l_i \cdot \alpha_i \cdot U_i(c_i) + \varphi \cdot \sum_i l_i^f \cdot \beta_i \cdot U_i^f(c_i^f)$$

$$\text{avec } \alpha_i = \frac{\alpha}{U'_i(y_i)} \quad \text{et } \alpha = \left( \sum_i \frac{l_i}{U'_i(y_i)} \right)^{-1}$$

$$\text{et } \beta_i = \frac{\beta}{U_i^{f'}(y_i^f)} \quad \text{et } \beta = \left( \sum_i \frac{l_i}{U_i^{f'}(y_i^f)} \right)^{-1}$$

- Solidarité universelle et statu quo géopolitique :

$$W = \sum_i l_i \cdot \alpha_i \cdot U_i(c_i) + \varphi \cdot \sum_i l_i^f \cdot \alpha_i \cdot U_i^f(c_i^f, d_1^f, \dots, d_{i-1}^f, d_{i+1}^f, \dots, d_N^f)$$

$$\text{avec } \alpha_i = \frac{\alpha}{U'_i(y_i)} \quad \text{et } \alpha = \left( \sum_i \frac{l_i}{U'_i(y_i)} \right)^{-1}$$

- Solidarité universelle et adaptation géopolitique :

$$W = \sum_i l_i \cdot \alpha_i \cdot U_i(c_i) + \varphi \cdot \sum_i l_i^f \cdot \beta_i \cdot U_i^f(c_i^f, d_1^f, \dots, d_{i-1}^f, d_{i+1}^f, \dots, d_N^f)$$

$$\text{avec } \alpha_i = \frac{\alpha}{U'_i(y_i)} \quad \text{et } \alpha = \left( \sum_i \frac{l_i}{U'_i(y_i)} \right)^{-1}$$

$$\text{et } \beta_i = \frac{\beta}{U_i^{f'}(y_i^f)} \quad \text{et } \beta = \left( \sum_i \frac{l_i}{U_i^{f'}(y_i^f)} \right)^{-1}$$

Les deux derniers cas correspondent en fait exactement au deux premiers, modifiés dans le critère d'utilité retenu pour la seconde période, avec une prise en compte collective des dommages. Dans le traitement de ces spécifications, nous faisons quatre hypothèses de travail supplémentaires :

- les consommations présentes et futures sont supposées complètement séparables ;
- les fonctions d'utilité individuelles sont deux fois différentiables, croissantes et convexes ( $U' > 0$  et  $U'' < 0$ )
- la somme pondérée des populations est normée à 1 (pour fixer le facteur d'échelle des poids de Negishi)
- toutes les régions ont le même taux de préférence pure pour le présent ( mais pas le même taux d'actualisation, selon les variations de taux de croissance.



## 2. UNE RÈGLE GÉNÉRALE POUR LE PARTAGE DU FARDEAU EN PREMIÈRE PÉRIODE

Quel que soit le mandat retenu, la maximisation du bien-être collectif correspond à la même répartition des abattements en première période. Nous retrouvons en fait la condition BLS dans le contexte de notre modèle puisque à l'optimum les dépenses d'abattement doivent être telles que les utilités marginales pondérées de la consommation soient égalisées entre toutes les régions :

$$\alpha_1 U'_1(y_1 - a_1) = \dots = \alpha_N U'_N(y_N - a_N)$$

Étant donné que les utilités marginales pondérées avant abattement étaient déjà égales, via le choix du jeu de poids qui obéissait à la clause de non-redistribution, l'égalisation après abattement ci-dessus revient à préconiser une décroissance identique des utilités marginales pondérées pour chaque région :

$$\alpha_1 U'_1(y_1) - \alpha_1 U'_1(y_1 - a_1) = \dots = \alpha_N U'_N(y_N) - \alpha_N U'_N(y_N - a_N)$$

La Figure 21 illustre cette condition d'optimalité pour deux régions, schématiquement une région riche et une région pauvre. À partir de préférences supposées identiques, l'utilité marginale de la consommation est plus élevée pour la région pauvre (point B) que pour la région riche (point A). La pondération des utilités dans la fonction de bien-être collectif conduit à une égalisation avant abattement des utilités marginales (points A et C, en normalisant le poids de la région riche à 1). Les abattements requis correspondent alors à un même déplacement vertical vers le haut à partir de ces deux points A et C sur les courbes d'utilité marginale pondérée. Si ce déplacement vertical croît, la somme des abattements  $a_{\text{poor}} + a_{\text{rich}}$  croît elle aussi.

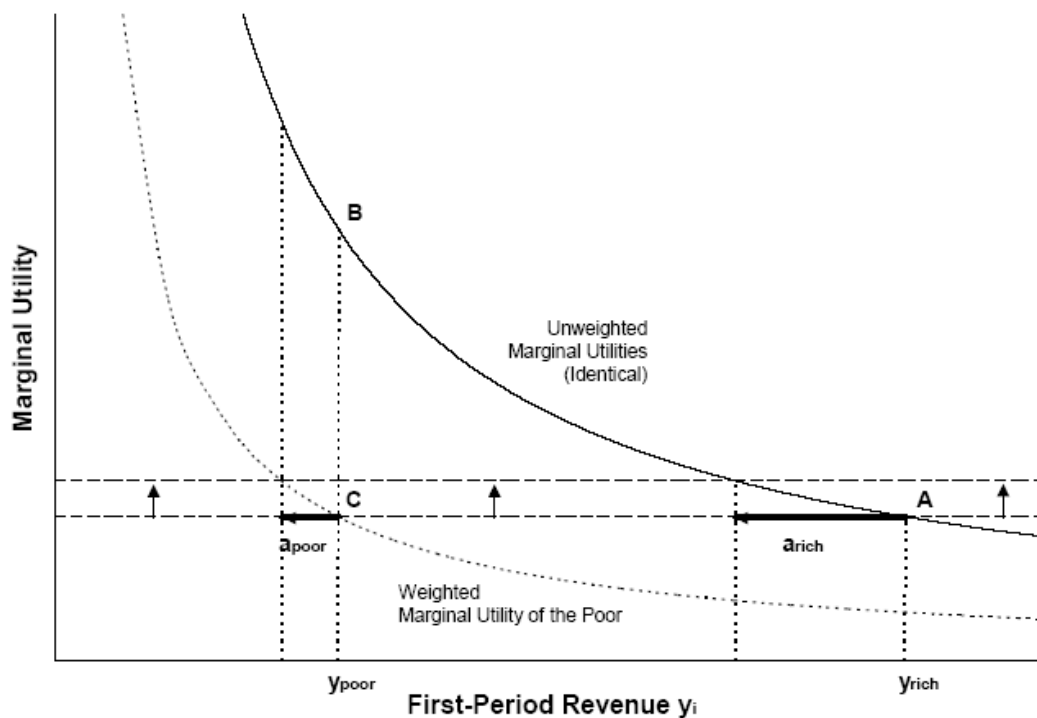


Figure 21 : Abattements optimaux de première période pour deux régions aux revenus différents

Il apparaît clairement sur ce schéma que les abattements réalisés par la région riche seront supérieurs à ceux réalisés par la région pauvre. Par une approximation de premier ordre (pour des dépenses d'abattement restant faibles par rapport aux niveaux de revenu), il est possible d'écrire :

$$-\frac{U''}{U'}(y_{poor}) \cdot a_{poor} \approx -\frac{U''}{U'}(y_{rich}) \cdot a_{rich}$$

En conséquence  $a_{poor} < a_{rich}$  si et seulement si la condition suivante est vérifiée :

$$-\frac{U''}{U'}(y_{poor}) > -\frac{U''}{U'}(y_{rich})$$

Cette condition est réalisée pour une large gamme de fonctions d'utilité, y compris les fonctions classiques logarithmiques  $U=\ln(c)$  ou exponentielles  $U=c^a$  (avec  $0 < a < 1$ ), pour lesquelles on a :

$$-\frac{U''}{U'} = \frac{1}{c}$$

Dans ce cas, les dépenses d'abattement optimales dans chaque région sont proportionnelles au revenu par tête. En prenant l'exemple des données économiques de 2000, un européen était en moyenne 46 fois plus riche qu'un indien, ce qui supposerait que le premier dépense 46 fois plus pour la réduction des émissions que l'indien. Ceci impliquerait alors des pertes comparables d'utilité marginale.

De cette analyse de première période, il est possible de tirer 4 remarques :

- (i) Toutes les régions sont censées participer aux réductions dès la première période
- (ii) Les contributions sont différenciées, et proportionnelles au niveau de revenu
- (iii) la règle de partage du fardeau est indépendante de l'ampleur du fardeau, c'est-à-dire de la quantité totale de bien public « climat stable » produite  $(x+x^f)$ .
- (iv) la règle de partage du fardeau est aussi indépendante de la localisation des dommages futurs, elle est donc robuste à l'incertitude et ne dépend que du contexte économique de première période.

Cette analyse aboutit donc à une « référence » normative robuste pour le partage du fardeau en première période, fondée sur des paramètres observables. Surtout, cette règle de partage est séparable des controverses sur l'équité intergénérationnelle et la distribution spatiale des dommages.

### 3. LE RÔLE CRUCIAL DU MANDAT DE NÉGOCIATION EN SECONDE PÉRIODE

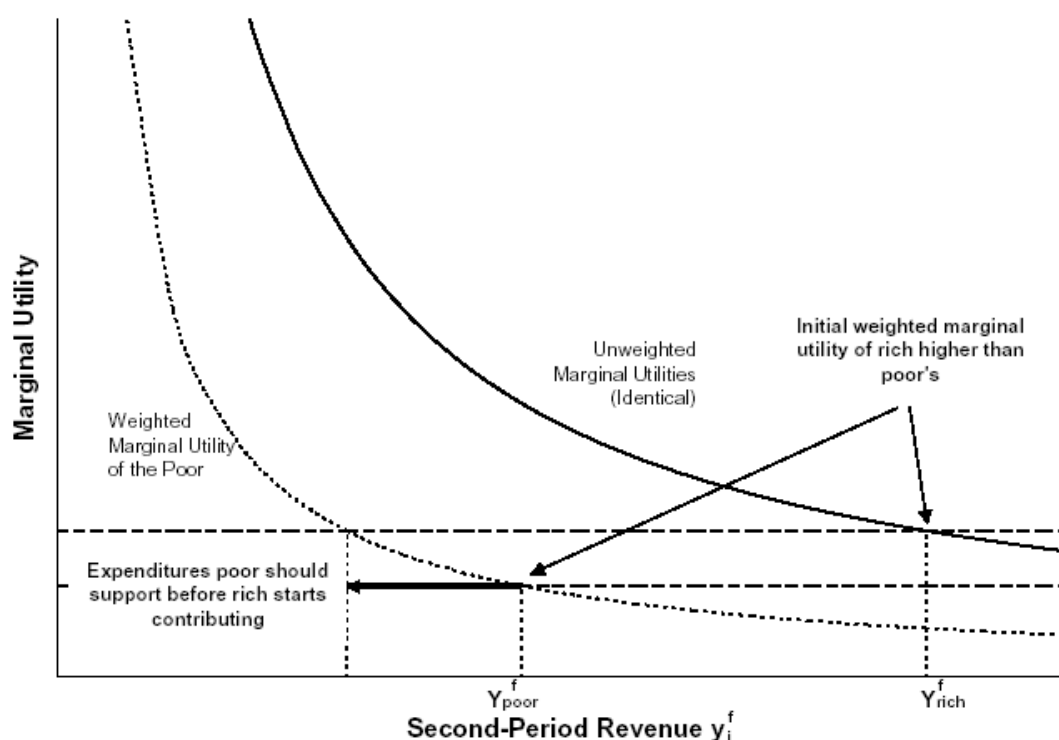
Nous examinons maintenant les conséquences des différents mandats sur les allocations optimales des dépenses d'abattement en seconde période.

#### 3.1. Solidarité dynastique et statu-quo géopolitique : risques d'instabilité

Dans un contexte de statu quo des rapports de force dans la négociation et de solidarité dynastique, le partage du fardeau obéit, comme en première période, à l'égalisation des utilités marginales de la consommation pondérées :

$$\alpha_1 U_1^{f'}(y_1^f - d_1^f(x + x^f) - a_1^f) = \dots = \alpha_N U_N^{f'}(y_N^f - d_N^f(x + x^f) - a_N^f)$$

Mais la distribution des dépenses d'abattement est cependant très différente, pour deux raisons. Premièrement, les dommages entrant maintenant dans l'équation, c'est la dépense totale impliquée par les dommages plus l'abattement qui conditionne la diminution égale d'utilité marginale pondérée. Deuxièmement, comme les poids sont calibrés sur la distribution des revenus de première période, la nouvelle distribution des revenus en seconde période n'a aucune raison de correspondre à un optimum. La Figure 22 illustre cet effet de seconde période. Si par exemple il y a eu rattrapage du revenu par tête, avec une réduction de l'écart entre un pays riche et un pays pauvre, alors l'utilité marginale du revenu pondérée du pays pauvre devient plus élevée que celle du pays riche (sans les dommages et les dépenses d'abattement). Pour parvenir à l'optimum, même en l'absence de dommages, il faudrait d'abord que le pays pauvre supporte une dépense suffisante, lui tout seul, pour égaliser son utilité marginale pondérée de la consommation avec celle du pays riche. C'est seulement au-delà de cette égalisation que les deux pays se verront attribuer les dépenses menant à la même perte d'utilité marginale pondérée.



**Figure 22 : Abattements optimaux de seconde période pour deux régions aux revenus différents**

Dans cette configuration, les pays dont la croissance est la plus forte entre les deux périodes seront donc plus pénalisés dans l'attribution des dépenses d'abattement. Donc si l'on se réfère aux scénarios de croissance des prochaines décennies, les économies en développement devraient financer la majeure partie des dépenses d'abattement futures. A titre d'exemple, si entre 2000 et 2010 les pays en développement ont une croissance par tête moyenne de 3% et les pays développés de 2.5% seulement, cela signifie que les PED pourraient atteindre un revenu par tête 5% plus élevé que s'ils avaient crû au même taux que les pays industrialisés. Cette croissance supplémentaire serait de l'ordre de 1% du PIB mondial en 2010. Selon la règle du statu quo dynastique, les dépenses d'abattement en 2010 devraient donc être supportées entièrement par les PED jusqu'à concurrence de ce montant de 1% du PIB mondial! Le fait de compter les dommages dans l'analyse de seconde période ne modère pas considérablement ce résultat paradoxal, au vu des évaluations existantes actuellement. Certes les

dommages sont censés être supérieurs dans les PED (McCarthy et al., 2001). Si l'on reprend notre cas où la croissance des PED est 0.5% plus élevée que celle des pays développés, cela conduit à 27% de croissance supplémentaire par rapport à un taux égal. Aucune évaluation des dommages potentiels, même des plus pessimistes, ne représente une perte d'une ampleur suffisante pour compenser ce gain de croissance, mis à part pour les îles menacées de submersion ou de l'Afrique subsaharienne. En conclusion, les pays en développement à forte croissance tels que la Chine, l'Inde ou le Brésil supporteraient à la fois des dommages plus élevés et des réductions plus importantes à effectuer.

Cette proposition semble tellement inacceptable du point de vue de l'équité que ces résultats remettent en question la pertinence du modèle présenté pour informer la décision. Il est logique de penser que dans ces conditions la renégociation de l'attribution des abattements serait inévitable lors des périodes d'engagement suivantes. Mais cette question n'est pas triviale pour au moins deux raisons. Tout d'abord, l'histoire politique fournit des cas réels et non-négligeables où la répartition des pouvoirs imprimée dans une institution à sa création peut avoir un impact de long-terme : le conseil de sécurité de l'ONU et le système de vote aux USA en sont des exemples. Ensuite, pour ce qui concerne le système de coordination de réduction des émissions mis en place à Kyoto via un système de marché de permis, un des problèmes majeurs est de donner aux agents économiques des règles claires pour le long-terme afin de faciliter leurs anticipations. Dès lors, des changements importants et réguliers dans les règles d'attribution des quotas impliquerait une inefficacité certaine du marché, les agents ne pouvant s'orienter aisément dans leurs décisions de long-terme.

Pourtant, la rhétorique du statu quo géopolitique n'est pas dénuée de sens : elle correspond à une règle de grandfathering prolongée dans les périodes futures. Le partage des dépenses d'abattement optimal en deuxième période correspond indirectement à une attribution des droits fondée sur les droits acquis en première période. Cela correspond aussi à l'argument selon lequel « le mode vie américain n'est pas négociable ». Or en première période, la méthode du grandfathering peut être légitimée par la nécessité d'opérer une transition acceptable d'une situation sans contrainte carbone à une situation sous contrainte. Mais cet argument ne tient plus sur le long-terme, ce qui peut expliquer le refus catégorique du G77 et de la Chine de s'engager sur ce mode : « there would be no agreement on carbon trading until the question of emission rights and entitlements is addressed equitably ». (UNFCCC, 1998).

### **3.2. Solidarité dynastique et adaptation géopolitique : le casse-têtes du jeu à somme nulle**

Lorsque l'on permet aux poids de changer et de s'adapter à la nouvelle distribution du revenu, avec une géopolitique adaptative, l'équation d'égalisation des utilités marginales pondérées à l'optimum devient :

$$\beta_1 U_1^{f'}(y_1^f - d_1^f(x + x^f) - a_1^f) = \dots = \beta_N U_N^{f'}(y_N^f - d_N^f(x + x^f) - a_N^f)$$

Les poids des utilités étant dans ce cas réactualisés en seconde période, pour faire correspondre la nouvelle distribution du revenu mondial à un optimum, l'analyse effectuée pour la première période au paragraphe 2 de ce chapitre est toujours valable. La seule différence est qu'ici c'est la « facture climatique » totale, composée des dommages et des dépenses d'abattement, qui est répartie de manière à égaliser les pertes d'utilité marginale pondérée. Autrement dit, les dépenses d'abattement vont dépendre non seulement de la nouvelle répartition du revenu mais aussi de la distribution spatiale des dommages résiduels.

Reprenons quelques exemples numériques comme dans le cas précédent pour illustrer l'impact de cette règle optimale. Nous supposons de nouveau que les pays développés (N) et les PED (S) ont la même

fonction d'utilité logarithmique. A la première période, leurs revenus par tête diffèrent d'un facteur 23. Mais une croissance du PIB par tête plus forte (3% au lieu de 2.5%) réduit cet écart à un facteur 28. Par contre l'évolution démographique de S est une croissance de 40% tandis que la population de N stagne. Les dommages dans les deux régions sont supposés être des fonctions quadratiques de  $(x+x^f)$ , mais nous allons formuler plusieurs hypothèses sur leur étendue dans chaque région, selon 4 scénarios, regroupés dans le Tableau 7 .

- Dans le scénario **a**, le changement climatique induit des pertes de revenu égales en part du revenu total pour N et S (5% maximum sans abattement). Dans ce cas les dépenses optimales d'abattement sont aussi proportionnelles au revenus par tête de seconde période, ainsi que les « factures climatiques » totales.

- Dans le scénario **b**, nous introduisons un déséquilibre dans les dommages en supposant que les dommages dans S sont 50% plus élevés que dans N (niveaux maxima sans abattement resp. 4% et 6%). Alors N se voit attribuer un plus grand effort de réduction, de telle sorte que la facture globale égalise les utilités marginales pondérées et donc que les pertes représentent les mêmes parts de revenu par tête (2.15%).

- Dans le scénario **c**, l'écart des dommages est creusé (maxima de 3% pour N et 7% pour S), et cela conduit à une contribution quasi nulle à l'abattement de S, dont la facture optimale est alors uniquement causée par les dommages plus importants.

- Dans le scénario **d**, lorsque l'on accentue encore plus le déséquilibre de la distribution des dommages, le modèle ne peut trouver de solution optimale égalisant les pourcentage de pertes par tête, à cause de la contrainte de non-redistribution ( $a_{South} > 0$ ) qui devient liante. La facture totale est alors inégale pour les deux régions : 2.47% pour le Sud contre 1.70 % du revenu par tête pour le Nord. Cette dernière situation n'est pas aberrante au vu des dommages potentiels pouvant pénaliser l'Afrique sub-saharienne ou les petites îles. Cette analyse fait émerger la question de compensations directes pour dommages très élevés. ces compensations pourraient apparaître dans le modèle à l'optimum si la contrainte de non-redistribution était plus flexible, en portant par exemple sur la facture totale (i.e.  $a^f + d^f > 0$ ).

Scénario de dommages			Optimum collectif					
	Dommage maximum au Nord	Dommage maximum au Sud	Dépenses d'abattement au Nord ( $a_N$ )	Dommages résiduels au Nord ( $d_N$ )	Facture climatique totale au Nord	Dépenses d'abattement au Sud ( $a_S$ )	Dommages résiduels au Sud ( $d_S$ )	Facture climatique totale au Sud
<b>a</b>	5 %	5 %	1.01 %	1.24 %	2.25 %	1.01 %	1.24 %	2.25 %
<b>b</b>	4 %	6 %	1.09 %	1.06 %	2.15 %	0.55 %	1.60 %	2.15 %
<b>c</b>	3 %	7 %	1.18 %	0.86 %	2.04 %	0.04 %	2.00 %	2.04 %
<b>d</b>	2 %	8 %	1.09 %	0.61 %	1.70 %	0 %	2.47 %	2.47 %

**Tableau 7: distribution des dépenses en seconde période - mandat dynastique adaptatif**

La principale difficulté de ce mandat de négociation provient cependant des difficultés propres à l'évaluation des dommages régionalisés. Plus on tente de désagréger les variations climatiques et d'en déduire des dommages localisées, plus les incertitudes s'élargissent : en Europe de l'ouest, il est possible de subir une hausse de température moyenne mais on envisage aussi un refroidissement brutal dû à l'arrêt de la circulation thermohaline ; la Russie pourra bénéficier de températures plus clémentes mais risque de subir une fonte du permafrost dangereuse.

Le Tableau 7 montre que la répartition optimale des dépenses d'abattement est extrêmement sensible à la distribution des dommages. Cette sensibilité rend le compromis particulièrement fragile,

puisque chaque Partie aura intérêt à majorer ses dommages attendus pour réduire les abattements qui lui seront demandés.

### **3.3. Règle de Solidarité Universelle : vers des régimes plus robustes à l'incertitude ?**

Les mandats de négociation reposant sur la solidarité dynastique reposent sur l'hypothèse aisément acceptable que chaque région s'occupe de ses propres descendants, comme le suggère le fonctionnement habituel de la diplomatie. Mais les mandats reposant sur une solidarité universelle peuvent aussi être envisagés, sans tomber pour autant dans un humanisme naïf. Un premier argument en faveur de cette attitude est cité dans (Schelling, 1995), qui mentionne que les individus ne sont plus distinguables au-delà d'un certain horizon de temps. Un second argument relève de l'intérêt égoïste « bien compris » des Parties : face à une menace de dommages graves, dont la distribution spatiale est très incertaine, les Parties doivent considérer qu'elles ne seront pas forcément dans le camp des privilégiés les moins touchés. A cela s'ajoutent les risques de propagation des déséquilibres induits par les dommages, via la déstabilisation de régimes économiques ou politiques en chaîne, ou via des ruptures fortes dans les flux migratoires. Le dommage qui affecte une certaine région devient alors potentiellement un dommage pour les autres. La « solidarité » s'entend alors comme une inter-dépendance forte entre toutes les économies.

Il est alors cohérent d'envisager un mandat composé d'un statu quo géopolitique en seconde période et d'une solidarité universelle : le statu quo fait référence à une attitude de protection égoïste des rapports de force par ceux qui les dominent, ce qui n'est pas antagoniste avec la solidarité universelle vue comme « intérêts bien compris » par les négociateurs. Par contre, en termes de distribution des dépenses d'abattement, nous retrouvons ici la difficulté mentionnée pour le statu quo dynastique, à savoir l'impact inéquitable de la persistance des poids de première période sur les dépenses d'abattement.

Dans un mandat adaptatif en solidarité universelle, les solutions optimales sont gouvernées par le même principe qu'avec un mandat adaptatif en solidarité dynastique, mais les dommages n'interviennent pas de la même manière. Une région peu touchée par les dommages va quand même intégrer le coût de dommages élevés dans d'autres régions, ce qui a deux conséquences :

- le niveau total de dommages considéré est plus élevé que dans le cas dynastique puisque chaque région compte aussi les dommages extérieurs. Nous allons détailler ce point dans la partie suivante.
- l'incertitude sur la distribution des dommages joue un rôle moindre : si les dommages attendus sur N impactent en fait sur S, l'erreur est en partie compensée par la prise en compte dans chaque fonction d'utilité des deux niveaux de dommages. L'incertitude locale constitue donc beaucoup moins un obstacle à la négociation.

## **4. NIVEAUX DE RÉDUCTION DES ÉMISSIONS**

Nous n'avons pas jusque là prêté attention au niveau global des réductions impliqué par chacun des mandats envisagé. Les niveaux d'abattement optimaux à chaque période sont donnés par les équations suivantes :

**En première période :**

$$C'(x) = -\varphi \cdot \sum_i l_i^f \omega_i \frac{U_i^{f'}(y_i^f - a_i^f - d_i(x + x^f))}{U_i'(y_i - a_i)} \cdot d_i'(x + x^f) \\ - \varphi \cdot \sum_i l_i^f \omega_i \sum_{j \neq i} \frac{\partial U_i^f / \partial d_j}{U_i'(y_i - a_i - d_i)} \cdot d_j'(x + x^f)$$

**En seconde période :**

$$C^{f'}(x^f) = -\sum_i l_i^f \pi_i d_i'(x + x^f) - \sum_i l_i^f \pi_i \sum_{j \neq i} \frac{\partial U_i^f / \partial d_j}{U_i'(y_i - a_i - d_i)} \cdot d_j'(x + x^f)$$

Les coefficients  $\omega_i$  correspondent aux ratios entre les poids de la fonction de bien-être global en seconde et en première période. Ils valent 1 dans les mandats « statu quo » et  $\beta_i/\alpha_i$  dans les mandats « adaptatifs ». Les coefficients  $\pi_i$  ont un sens différent : ils correspondent au ratio entre l'utilité marginale pondérée de la consommation et le prix implicite du carbone en seconde période. Lorsqu'un pays contribue aux dépenses d'abattement en seconde période, i.e. que son coefficient  $a^f$  n'est pas nul, alors ce coefficient  $\pi_i$  est égal à 1. Mais lorsqu'il ne contribue pas à ces dépenses, soit parce qu'il a connu un taux de croissance plus faible que les autres pays, dans les mandats « statu quo », soit qu'il subisse des dommages très élevés dans un mandat « adaptatif », alors le coefficient  $\pi_i$  est supérieur à 1.

Que signifient les deux équations ci-dessus ? Commençons par le cas simple du mandat adaptatif dynastique. Nous avons alors  $\omega_i = \beta_i/\alpha_i$  et les seconds termes des équations disparaissent parce que dans le cas dynastique les utilités régionales ne dépendent pas des dommages des autres régions. Nous obtenons alors les équations simplifiées suivantes :

$$C'(x) = -\rho \sum_i l_i^f d_i'(x + x^f) \\ C^{f'}(x^f) = -\sum_i l_i^f d_i'(x + x^f)$$

Le facteur  $\rho$  est le taux d'actualisation moyen de la consommation, dépendant du facteur d'actualisation  $\varphi$ , du taux de croissance et de la forme des fonctions d'utilité.

De ces équations émerge un résultat important : le seul déterminant important des efforts de réduction est la fonction de dommage marginal mondial :  $\sum_i l_i^f d_i'(x + x^f)$ . Les poids  $\alpha_i$  et  $\beta_i$  n'ont pas d'importance dans la fixation du niveau d'effort, ils jouent un rôle uniquement dans la distribution spatiale des efforts. Ce résultat, qui nous fait penser très fortement à la règle standard de Bowen-Lindhal-Samuelson, a des implications politiques cruciales. Il va en effet dans le sens d'un découplage des débats portant d'une part sur le niveau d'effort global et d'autre part sur la répartition de l'effort en première période. De même le niveau optimal de réduction ne dépend pas de la distribution des dommages mais uniquement de la somme des dommages sur le monde entier.

Examinons le cas dans lequel certaines régions ne sont pas appelées à contribuer aux dépenses d'abattement (avec  $\pi_i$  supérieur à 1). Dans ce cas, la solution analytique nous montre que les conclusions

que nous venons juste de tirer quant à la séparabilité entre le niveau d'effort global et la répartition des dommages ne tiennent plus. En seconde période le niveau d'abattement global dépend de la répartition des dommages puisque la pondération par les  $\pi_i$  ne permet plus d'identifier la fonction de dommage marginale globale avec la somme des dommages régionaux marginaux pondérés. Cependant, nos simulations numériques montrent que ces déformations restent faibles. Nous avons reporté dans le Tableau 8 les résultats correspondant à plusieurs scénarios avec une part croissante des dommages globaux affectant la région S. Mais même dans le cas le plus déséquilibré (scénario j) dans lequel S subit l'intégralité des dommages, le niveau optimal de réduction globale ne diminue que de 0.7% par rapport au cas où les dommages tombent également sur N et S par rapport à leur revenu (scénario a : maxima de 5% de leur revenu). L'intuition derrière ce résultat est que malgré un écart important des dommages régionaux, cela ne crée qu'un écart très faible entre le prix implicite du carbone et l'utilité marginale pondérée, conduisant à une valeur de  $\pi_i$  qui reste proche de 1.

	scénario de dommages		Politique optimale		
	Domage max. N	Domage max. S	Émissions totales	Facture de 2 <sup>de</sup> période N	Facture de 2 <sup>de</sup> période S
a	5.0 %	5.0 %	754	2.25 %	2.25 %
b	4.5 %	6.2 %	754	2.25 %	2.25 %
c	4.0 %	7.4 %	754	2.25 %	2.25 %
d	3.5 %	8.6 %	754	2.25 %	2.25 %
e	3.0 %	9.8 %	754	2.17 %	2.44 %
f	2.0 %	12.2 %	753	1.93 %	3.02 %
g	1.0 %	14.7 %	751	1.69 %	3.59 %
h	0.5 %	15.9 %	750	1.58 %	3.87 %
j	0.0 %	17.1 %	749	1.46 %	4.15 %

**Tableau 8: niveau d'abattement total sous le mandat dynastique adaptatif**

Lorsque nous comparons ce cas avec le mandat de **statu-quo** dynastique conduit à un abattement plus élevé : le niveau d'abattement de première période est inchangé, tandis qu'il augmente en seconde période, comme le montre le Tableau 9. Là encore, ce sont les poids  $\pi_i$  qui ne sont pas tous égaux à 1 : ils sont égaux à 1 dans les régions dont la croissance est la plus forte (S), ces pays payant l'ensemble de la facture des réductions des émissions, tandis qu'ils sont supérieurs à 1 dans les régions à plus faible croissance (N) qui ne participent pas. Cela conduit alors à un abattement optimal plus important en seconde période. La constance de l'abattement de première période est elle justifiée parce que le taux d'actualisation  $\rho$  augmente et compense la diminution du dommage marginal. Des simulations numériques réalisées avec les mêmes hypothèses que précédemment montrent que l'abattement optimal sur le budget carbone total sur les deux périodes passe de 28% à 30% lorsque l'on passe sous un mandat statu-quo : en première période, l'abattement passe de 5% à 6%, et en seconde période de 45% à 48%.

		Attitude diplomatique	
		Statu-quo	Adaptatif
Solidarité avec les générations futures	dynastique	(488, 358)	(484, 380)
	universelle	(482, 282)	(477, 310)

**Tableau 9 : Niveaux d'émissions optimaux sous les 4 mandats envisagés**



Examinons enfin les conséquences d'un mandat universel. Dans le cas d'un mandat adaptatif en solidarité universelle, le volume d'abattement croît de façon significative. Les équations donnant le niveau optimal ci-dessus montrent en effet que la valeur totale des dommages prise en compte par le planificateur est plus importante puisque chaque utilité régionale dépend aussi des dommages extérieurs. L'ampleur de ces effets trans-régionaux dépend bien sûr de la forme de la fonction d'utilité « universelle » de chaque région. Supposons par exemple que les dommages maxima sont évalués 2% du revenu pour N et 5% pour S. Comparons ensuite les résultats obtenus sous les deux mandats adaptatifs, le premier avec une solidarité dynastique, le second en solidarité universelle<sup>28</sup> : le niveau d'abattement grimpe de 28% dans le premier cas à 34% dans le second.

## 5. CONCLUSION

Nous avons déjà mentionné l'importance du réflexe de séparabilité entre équité et efficacité dans les négociations. La position de l'IPCC selon laquelle « pour les besoins de l'analyse, il est possible de séparer l'efficacité de l'équité (dans l'analyse des politiques de réduction du changement climatique) » (Bruce et al. 1996, p.6), faisant écho d'une part au second théorème du bien-être et d'autre part à la crainte, en partie justifiée par la pratique, qu'on les économistes de débats insolubles sur les controverses éthiques, n'est pas tenable. Deux raisons ont été évoquées jusque là dans la littérature. Le premier émane de (Chichilnisky et al., 2000), qui montrent que dans le cas de la production d'un bien public produit de manière privée, seules certaines allocations initiales des droits d'émissions permettent de conduire à un optimum. Le second argument, plus pragmatique, consiste à souligner que les arguments d'équité ne peuvent être évincés de la discussion sur les régimes futurs : ils restent au centre des débats, et notamment de la recherche d'une plus grande efficacité, puisque celle-ci dépend de l'élargissement de la coordination au plus grand nombre possible d'émetteurs (Toth et al., 2001).

Notre exercice analytique permet d'aller plus loin dans la réflexion sur l'orthogonalité équité-efficacité, en la replaçant dans un modèle normatif intégrant les dommages futurs. Tout en maintenant une contrainte de non-redistribution, comme une borne d'acceptabilité, nous montrons qu'une politique de production de bien public global, ici représentée très schématiquement sur un modèle à deux périodes, rencontre deux questions fondamentales liées à l'équité :

- quelle attitude diplomatique peut prévaloir dans la négociation du régime de coordination ?
- quelle attitude intergénérationnelle les négociateurs adoptent-ils vis-à-vis des risques futurs ?

Dans le traitement de la première question, nous avons vu que l'attitude « statu quo » conduit au paradoxe d'une facture plus élevée pour les pays en développement dont la croissance est plus forte. Cela ne peut donc raisonnablement mener à un accord acceptable par ces pays. L'attitude adaptative est par contre susceptible de lever cet obstacle et de conduire à des fardeaux répartis en fonction du niveau de revenu sur les deux périodes. Néanmoins cette règle s'applique à la facture totale, incluant coûts de réduction et dommages, en seconde période, et doit donc prendre en compte la difficulté d'évaluation des dommages. Ceci constitue une complication pour la négociation. Premièrement certaines régions susceptibles d'être particulièrement impactées ne contribuent pas aux abattements, voire devraient être compensées si la contrainte politique de non-redistribution n'était pas liante. Deuxièmement, les

---

<sup>28</sup> Dans le cas de la solidarité universelle, le facteur multiplicatif dépendant des dommages trans-régionaux dans les fonctions d'utilité de seconde période sont supposés être égaux à 1 lorsque les dommages sont nuls et à 0.99 lorsqu'ils sont à leur maximum (perte d'utilité de 1%).

controverses sur les gains et les pertes des uns et des autres sont susceptibles de créer des blocages dans les négociations, à cause des incertitudes très larges en jeu.

Ces controverses sur les dommages deviennent moins importantes sous les mandats de solidarité universelle, que ceux-ci soit justifiés pour des raisons politiques de bienveillance à l'égard de pays partenaires, par crainte des effets de propagation ou bien par défiance vis-à-vis des évaluations incertaines des dommages potentiels. Dans ces cas, la production du bien public climat est plus élevée. Son niveau et sa répartition soit bien moins sensible au jeu des poids de la fonction de bien-être global qu'à la prise en compte des dommages trans-régionaux dans les fonctions d'utilité.

Quels enseignements principaux cette analyse dégage-t-elle pour éclairer la question des régimes futurs ? Nous en distinguons deux principaux :

- l'allocation optimale des coûts liés au climat suit en général une règle simple de proportionnalité avec le revenu par tête, en cohérence avec le principe des « responsabilités communes mais différenciées » inscrit dans la convention de Rio. Mais cette règle générale n'émerge que si les Parties dominant les rapports de force aujourd'hui n'utilisent pas leur influence pour bloquer l'émergence d'autres Parties dans la négociation future, par exemple via des verrouillages institutionnels.

- le fardeau de première période est indépendant du niveau global d'effort optimal et de la distribution des dommages. Cela peut être important pour les périodes suivant immédiatement Kyoto, dans lesquelles les dommages dus au changement climatique d'origine anthropique resteraient faibles. Cela ne tient plus sur le long-terme où distribution des dommages et allocation des efforts ne sont plus séparables. Les approches en solidarité universelle permettent de limiter les risques liés aux erreurs entre évaluations des dommages *ex ante* et *ex post*.

Cette analyse permet de proposer une référence normative de règle de partage du fardeau, à laquelle on pourrait comparer les nombreuses règles d'allocation proposées et analysées dans les chapitres précédents.

## CHAPITRE 4

### PARTAGE DU FARDEAU CLIMATIQUE SELON LES RÈGLES D'ALLOCATION PROPOSÉES : QUEL CRITÈRE D'ACCEPTABILITÉ ?

---

Au cours du second chapitre, l'analyse des conséquences des différentes règles d'allocation de quotas sous incertitude concernant le monde futur (c'est-à-dire sous différentes hypothèses de croissance économique, démographique et de coûts d'abattement) nous a confrontés à la difficulté de cerner la notion et les critères d'acceptabilité de ces règles. Le choix des indicateurs à prendre en compte est crucial dans l'appréciation de l'acceptabilité des différents régimes : transferts totaux sur le marché des crédits d'émissions, coûts régionaux du système international de quotas, coût final pour les consommateurs. Ce constat a conduit à privilégier des approches positives, dans lesquelles des simulations de natures diverses ont permis de mieux baliser le débat des règles d'allocation ou plus largement du système de coordination par les quantités. L'accent a été mis sur certains paramètres souvent occultés par les discussions concernant les grands *principes* d'équité et de répartition des efforts mondiaux : par exemple les perturbations induites par les règles d'entrée des PED, le comportement variable des règles face à l'incertitude, les conséquences très variables des modalités de recyclage des revenus des échanges de permis. Ces *clés d'ajustement* des règles de coordination se révèlent aussi importantes que le choix d'un principe fondateur pour la coordination.

Dans les travaux du troisième chapitre, nous sommes revenus sur la notion d'acceptabilité, au moyen d'une approche plus normative. Sans aborder les nombreuses discussions et tentatives de classement autour des principes d'équité pouvant guider le choix des règles, l'enjeu était de construire et d'analyser des règles définies de manière *normative*, construites à partir de la maximisation du bien-être collectif mondial, ces règles étant susceptibles, dans un cadre très schématique, de fournir un repère dans le débat sur la définition du régime futur, et de révéler les hypothèses sous-jacentes à tel ou tel type de répartition.

Ce chapitre propose de rapprocher les deux approches abordés précédemment, en comparant les logiques de pensées développées dans les chapitres précédents, l'une ne prenant pas en compte les dommages, l'autre tentant d'établir une référence normative pour satisfaire un critère de préférences collectives, en prenant en compte les dommages. L'intuition au départ de ce dernier chapitre est que nous obtenons deux visions très différentes de l'acceptabilité si l'on prend ou non en compte ces dommages potentiels. En effet si les dommages sont inégalement répartis, l'acceptabilité du fardeau dépendra des montants de compensation accordés par les pays peu touchés à ceux qui subissent des pertes importantes. Donc en se focalisant sur les transferts obtenus par différentes règles (chap. 2), y compris par une optimisation du bien-être collectif (chap. 3), nous avons une autre appréciation de l'acceptabilité du régime que lorsque l'acceptabilité est spécifiquement liée au choix des poids d'agrégation qui sont justement retenus dans une fonction de bien-être collectif.

Pour contourner le problème lié à l'incertitude sur les fonctions de dommages et limiter l'explosion combinatoire provoquée par la combinaison des hypothèses sur les règles, sur les scénarios et sur les dommages, notre démarche consiste ici à :

- repartir d'un cadre normatif ressemblant à celui du chapitre 3, composé d'une fonction de bien-être collectif incluant revenu national, coûts d'abattement et dommages climatiques,

- fixer une contrainte d'émissions, issue d'un accord global sur l'objectif environnemental et la trajectoire d'émissions à respecter, et ne conserver qu'une seule hypothèse sur la croissance économique future (coûts et scénario)<sup>29</sup>,

- mener un calcul analytique puis numérique sur la répartition optimale des efforts et les transferts associés, en fonction des poids adoptés pour pondérer les différentes utilités régionales dans la fonction de bien-être collectif que nous maximisons sous contrainte d'émissions.

La conséquence pratique de ce mode opératoire, qu'il faut bien garder à l'esprit dans toute cette partie, est que nous allons « confier » au marché de quotas, incluant allocation initiale et transferts sur le marché, le rôle de fournir des compensations aux pays qui seraient les plus touchés par le changement climatique.

## 1. PRÉSENTATION DU MODÈLE ET RÉOLUTION ANALYTIQUE

Nous nous replaçons ici dans l'hypothèse d'un président de COP – planificateur bienveillant chargé de proposer une règle de coordination efficace et acceptable par le plus grand nombre. Nous supposons comme au chapitre précédent qu'il cherche à maximiser une fonction de bien être global. Celle-ci s'écrit pour  $r$  régions et  $t$  périodes successives :

$$W = \sum_{t=1}^T \delta^t \sum_r l_{rt} \alpha_{rt} u_{rt}(c_{rt}, d_{1t}, \dots, d_{nt})$$

avec  $\delta$  le taux de préférence pure pour le présent,  $l_{rt}$  la population de la région  $r$  à la période  $t$ ,  $\alpha_{rt}$  le poids de l'utilité de la région  $r$  au temps  $t$ ,  $u_{rt}$  la fonction d'utilité de l'agent représentatif de la région  $r$  à la période  $t$  ( $u$  croissante et concave),  $c_{rt}$  consommation de l'agent représentatif de la région  $r$  à la période  $t$ . Nous nous plaçons ici dans le cas de la solidarité universelle et de mandats adaptatifs : au vu des conclusions du chapitre précédent, nous avons montré que c'est le contexte de négociation qui était le plus favorable à l'accord. En fait le caractère universel de la solidarité ne change pas l'analyse ci-dessous tant que l'on retient une spécification analytique telle que celle du chapitre précédent (un facteur multiplicatif de désutilité venant des dommages agrégés) et que les dommages eux-mêmes ne dépendent pas des montants de transferts accordés. Dans la réalité, il est légitime de penser que des transferts élevés auront un impact à la fois sur la croissance économique et sur la vulnérabilité des pays.

Comme nous l'avons vu précédemment, les poids d'agrégation peuvent refléter l'évolution des rapports de force dans la négociation. Ils seront supposés être égaux, à une constante près, à l'inverse des utilités marginales du revenu des différentes régions à la première période (poids de Negishi) pour traduire la contrainte de non-redistribution des politiques climatiques. Leur évolution ultérieure dépendra du mode d'évolution des institutions, schématiquement soit bloquée dans un rapport de force « inscrit dans le marbre », soit évolutive selon les croissances régionales différenciées.

Nous nous situons par ailleurs dans le cadre d'un marché de permis d'émission négociables (PEN), entre  $r$  régions et sur  $t$  périodes. A chaque période, nous supposons connues la courbe des coûts d'abattement et les émissions de référence (hypothèse d'information parfaite) pour chaque région. Avec ces données, il est aisé de déduire une courbe d'abattement globale et les émissions totales de référence pour chaque période. Par ailleurs, et cela constitue une différence avec l'exercice précédent, nous partons d'une trajectoire de stabilisation du climat exogène, c'est-à-dire d'un plafond d'émissions pour chaque période. Nous en déduisons donc le prix du carbone  $pC(t)$ , égal au coût de la dernière tonne de carbone

<sup>29</sup> C'est-à-dire que nous mettons de côté pour cette analyse les incertitudes que nous avons analysées au chapitre 2.

évitée sur la courbe de coût marginal globale. Chaque région ajuste ensuite son niveau d'émission tel que son coût marginal d'abattement soit égal à  $pC(t)$ . C'est seulement en fonction de la répartition initiale des permis, que chaque région pourra vendre ou devra acheter des quotas (au prix  $pC(t)$ ) pour les différentes périodes considérées. On en déduit le niveau de consommation par tête dans chaque région et à chaque période :

$$c_{rt} = y_{rt} - ab_{rt} - d_{rt} + \phi_{rt}$$

où  $y_{rt}$  est le revenu par tête de référence,  $ab_{rt}$  les dépenses d'abattement,  $d_{rt}$  les dommages régionaux et  $\Phi_{rt}$  les transferts résultants du fonctionnement du marché de quotas.

Dans le programme d'optimisation ci-dessous, la variable de contrôle est le flux d'argent lié à la vente ou à l'achat des PEN. Or avec nos hypothèses, il existe un lien direct et univoque entre la valeur du vecteur flux à la période  $t$  et l'allocation initiale de permis pour cette même période. Dans ce modèle, il est donc équivalent de travailler sur les flux ou sur les règles d'allocation qui correspondent aux enjeux des négociations.

$$\text{Max}_{\phi_{rt}} W \quad \text{sous la contrainte } \forall t \quad \sum_r l_{rt} \phi_{rt} = 0 \quad (2)$$

La résolution analytique de ce programme passe par le calcul du Lagrangien :

$$L = \sum_{t=1}^T \delta^t \sum_r l_{rt} \alpha_{rt} u(y_{rt} - ab_{rt} - d_{rt} + \phi_{rt}, d_{1t}, \dots, d_{nt}) - \lambda_t \sum_r l_{rt} \phi_{rt}$$

Les conditions du premier ordre s'écrivent alors :

$$\begin{aligned} \frac{dL}{d\phi_{rt}} &= 0 \\ \Leftrightarrow \forall r, \forall t \quad \delta^t l_{rt} \alpha_{rt} u'(y_{rt} - ab_{rt} - d_{rt} + \phi_{rt}) \beta_t &= \lambda_t l_{rt} \end{aligned}$$

Le facteur  $\beta$  représente le facteur de désutilité traduisant la prise en compte « universelle » des dommages par toutes les régions. Dans un cadre général nous trouvons donc la règle d'optimalité suivante :

$$\forall t, \forall (i, j) \in \{1, r\} \quad \frac{\alpha_{it} \frac{du(c_{it})}{d\phi}}{\alpha_{jt} \frac{du(c_{jt})}{d\phi}} = 1$$

Les flux optimaux permettent, à chaque période, d'ajuster la consommation des différents agents représentatifs, afin d'égaliser leur utilité marginale pondérée par les poids d'agrégation, de même que dans le modèle du chapitre 3, les dépenses d'abattement étaient allouées pour satisfaire la même condition. En supposant que  $u(\cdot) = \ln(\cdot)$ , nous obtenons:

$$\forall r, \forall t \quad \frac{\delta^t l_r \alpha_{rt}}{y_{rt} - ab_{rt} - d_{rt} + \phi_{rt}} = \frac{\lambda_t l_r}{\beta_t}$$

En réinjectant dans la contrainte d'équilibre du marché de quotas nous trouvons :

$$\begin{aligned} \forall t \quad \sum_r l_r (\delta^t l_r \alpha_{rt} \frac{\beta_t}{\lambda_t l_r} - (y_{rt} - ab_{rt} - d_{rt})) &= 0 \\ \Leftrightarrow \frac{\delta^t \beta_t}{\lambda_t} &= \frac{\sum_r Y_{rt} - Ab_{rt} - D_{rt}}{\sum_r l_r \alpha_{rt}} \end{aligned}$$

avec :  $Y_{rt} = l_{rt} * y_{rt}$ , le PIB de la région  $r$  à la période  $t$ ,  $Ab_{rt} = l_{rt} * ab_{rt}$ , les coûts d'abattement de la région  $r$  à la période  $t$ ,  $D_{rt} = l_{rt} * d_{rt}$ , les dommages de la région  $r$  à la période  $t$ .

Cela nous permet finalement d'obtenir la valeur des transferts optimaux :

$$\begin{aligned} l_{rt} \phi_{rt} &= \left[ \frac{l_r \alpha_{rt}}{\sum_r l_r \alpha_{rt}} \sum_r (Y_{rt} - Ab_{rt} - D_{rt}) \right] - (Y_{rt} - Ab_{rt} - D_{rt}) \\ l_{rt} \phi_{rt} &= \left[ Ab_{rt} + D_{rt} - \frac{l_r \alpha_{rt}}{\sum_r l_r \alpha_{rt}} \sum_r (Ab_{rt} + D_{rt}) \right] - \left[ Y_{rt} - \frac{l_r \alpha_{rt}}{\sum_r l_r \alpha_{rt}} \sum_r Y_{rt} \right] \end{aligned}$$

Que signifie ce résultat ? Il traduit simplement le fait que les transferts (et donc l'allocation initiale des quotas) sont censés permettre des niveaux de consommation finaux (après abattement et dommages) optimaux (et donc dépendant des poids des fonctions d'utilité), en comblant l'écart entre ces niveaux de consommation optimaux et ceux qui résultent des dépenses d'abattement faites pour égaliser le coût du marché et des dommages régionalisés. On pressent ici l'importance du choix des poids d'agrégation.

En adoptant les poids de Negishi « adaptatifs » du chapitre précédent, avec une utilité logarithmique,  $\alpha_{rt} = y_{rt}$ , et nous obtenons

$$l_{rt} \phi_{rt} = Ab_{rt} + D_{rt} - \frac{Y_{rt}}{\sum_r Y_{rt}} \sum_r (Ab_{rt} + D_{rt})$$

Les transferts obéissent ici simplement à la règle d'une répartition des dépenses d'abattement qui égalise le pourcentage de pertes par rapport au PIB dans chaque région, et donc à la perte globale par rapport au PIB mondial.

Que se passe-t-il dans le cas d'un jeu de pondération complètement égalitaire, du type « **un homme, un vote** »,  $\alpha_{rt} = 1$ , les transferts optimaux s'écrivent :

$$l_{rt} \phi_{rt} = Ab_{rt} + D_{rt} - \frac{l_r}{\sum_r l_r} \sum_r (Ab_{rt} + D_{rt}) - (Y_{rt} - \frac{l_r}{\sum_r l_r} \sum_r Y_{rt})$$

Avec une telle pondération dans l'agrégation des utilités régionales, la distribution initiale des richesses au début de chaque période n'est plus optimale. De plus, comme nous le verrons dans nos simulations, les dépenses d'abattement  $Ab_{rt}$  et celles liées aux dommages  $D_{rt}$  n'excèdent pas quelques pour cents du PIB, le dernier terme dans l'équation précédente domine donc largement les deux premiers. Le planificateur central fait donc face à des transferts massifs des pays du Nord vers le Sud, correspondant à une redistribution générale des richesses, visant à égaliser la richesse par tête. Ce cas extrême n'est bien sûr pas envisageable, il peut simplement servir de « balise » extrême dans le débat. Cette solution peut en effet être accusée de modifier considérablement la distribution mondiale des revenus et n'est donc pas acceptable dans le cadre de la négociation climatique.

## 2. SIMULATIONS

### 2.1. Hypothèses

Notre modèle étant très proche de celui qui a été utilisé pour le chapitre 2, nous ne représentons pas ici les données utilisées qui ont déjà été détaillées et sont reprises ici : 12 régions, périodes de 5 ans, marché parfaitement concurrentiel, courbes de coûts d'abattement produites par le modèle EPPA du MIT. L'incertitude n'étant plus au cœur de la réflexion de ce chapitre, nous nous focalisons sur un scénario, le scénario A1 produit par l'IIASA<sup>30</sup>. Nous adoptons une trajectoire de stabilisation à 550 ppm CO<sub>2</sub> intermédiaire déjà présentée dans le cadre de la règle Contraction et Convergence.

De plus le modèle est complété par un module de dommages qui traduit la chaîne des impacts des émissions aux dommages de manière très simplifiée (cf. encadré ci-dessous), similaire au modèle inclus dans la proposition brésilienne de partage du fardeau selon les responsabilités passées (den Elzen et al., 1999).

#### Module simplifié de la chaîne des impacts des émissions à la température moyenne

- Calcul des concentrations en CO<sub>2</sub>

$$\rho(t) = C \cdot \int_{-\infty}^t E(t') \cdot e^{-\frac{t-t'}{\tau_s}} \cdot dt'$$

avec :

- $C = 0,56$  ppmv/GtC (concentration-to-mass conversion factor)
- $\tau = 140$  ans (atmospheric life time)

- Passage aux forçages radiatifs

$$\Delta Q(t) = \sigma \cdot \Delta \rho(t)$$

avec :

- $\sigma = 0,014135$  W/m<sup>2</sup>/GtC (calibré sur les données IPCC de forçages radiatifs historiques)

- Variation de température

<sup>30</sup> Le scénario IWA1 suppose une croissance assez forte et repose principalement sur l'utilisation du pétrole et du gaz, tous deux disponibles en grande quantité. Il reste relativement médian en ce qui concerne les émissions.

$$\Delta\Theta(t) = \frac{1}{C} \cdot \int_{-\infty}^t \Delta Q(t') \cdot \left[ \sum_{s=1}^2 \frac{l_s}{\tau_s} \cdot e^{-(t-t')/\tau_s} \right] \cdot dt'$$

Où la variable  $s \in \{1,2\}$  représente les deux temps caractéristiques de réponse du système couplé océan-atmosphère.

$$\Delta\Theta(t) = \Delta\Theta_1(t) + \Delta\Theta_2(t)$$

Pour passer d'une période à la suivante nous avons donc les équations récursives suivantes :

$$\Delta\Theta_1(T+1) = \Delta\Theta_1(T) \cdot e^{-\frac{1}{\tau_1}} + \frac{1}{C} \cdot \Delta Q(T+1) \cdot l_1 \cdot \left( 1 - e^{-\frac{5}{\tau_1}} \right)$$

$$\Delta\Theta_2(T+1) = \Delta\Theta_2(T) \cdot e^{-\frac{1}{\tau_2}} + \frac{1}{C} \cdot \Delta Q(T+1) \cdot l_2 \cdot \left( 1 - e^{-\frac{5}{\tau_2}} \right)$$

avec :

- $\tau_1 = 20$  ans (réaction rapide)
- $l_1 = 0,634$
- $\tau_2 = 990$  (réaction lente)
- $l_2 = 0,366$
- $C = 1,6825037$  J/K (heat capacity of the climate system, calibré sur les données IPCC)

Pour l'évaluation régionalisée des dommages, nous partons des résultats de (Mendelsohn *et al.*, 2000). Ces auteurs donnent des estimations des impacts du changement climatique en 2060, pour une élévation de température moyenne globale de +2°C. Cinq secteurs sont étudiés : l'agriculture, la sylviculture, les impacts liés à la hausse du niveau des mers, les impacts sur le secteur énergétique (résidentiel et industriel) et les impacts sur la ressource en eau. Les estimations des impacts prennent en compte les niveaux d'adaptation et sont calculés à partir d'une projection des économies futures. Les résultats concernent six grandes régions du globe, et des estimations sont également données pour certains pays. Pour aboutir au découpage en douze régions, nous désagrégeons les six zones précédentes en fonction des informations sur les pays ou en considérant que les dommages par rapport au PIB seront répartis de façon uniforme à l'intérieur de chaque zone, ce qui correspond à une approximation assez grossière. Pour les douze régions, nous obtenons donc une estimation des dommages en pourcentage du revenu régional pour un réchauffement moyen de +2°C. Ces résultats nous permettent ensuite de calibrer nos fonctions de dommages par rapport à l'élévation de température que nous avons estimée. Nous pourrions ensuite prendre en compte ces données dans le calcul de la fonction de bien-être W. Enfin, nous considérons trois formes de fonction de dommages, exprimée en % du PIB:

- Forme linéaire :  $D_{rt} = l_{rt} \cdot \Delta T$
- Forme quadratique :  $D_{rt} = q_{rt} \cdot (\Delta T)^2$
- Forme cubique :  $D_{rt} = c_{rt} \cdot (\Delta T)^3$

où les coefficients  $l_{rt}$ ,  $q_{rt}$  et  $c_{rt}$  sont déterminés par nos points de calibrages. Les niveaux de dommages obtenus pour 2050 sont reportés dans la figure 23.

Comme le remarque (Ambrosi, 2004), ces évaluations des dommages sont très fragiles. Tout d'abord les impacts ne sont pas évalués dans tous les secteurs. De plus, les estimations sont faites en équilibre partiel, les secteurs étant étudiés séparément. Nous négligeons donc complètement les effets de propagation que l'on peut mettre en évidence en travaillant en équilibre général. Enfin, le modèle est statique, c'est-à-dire que nous ne tenons pas compte des vitesses de transition et des temps de réaction des sociétés. Cela rend d'ailleurs l'analyse coûts bénéfiques très fragile. Ici nous raisonnons donc plutôt selon la



métaphore d'un planificateur central raisonnant en coût-efficacité, où nous faisons l'hypothèse que l'objectif environnement est obtenu par négociations et par consensus entre les différentes régions.

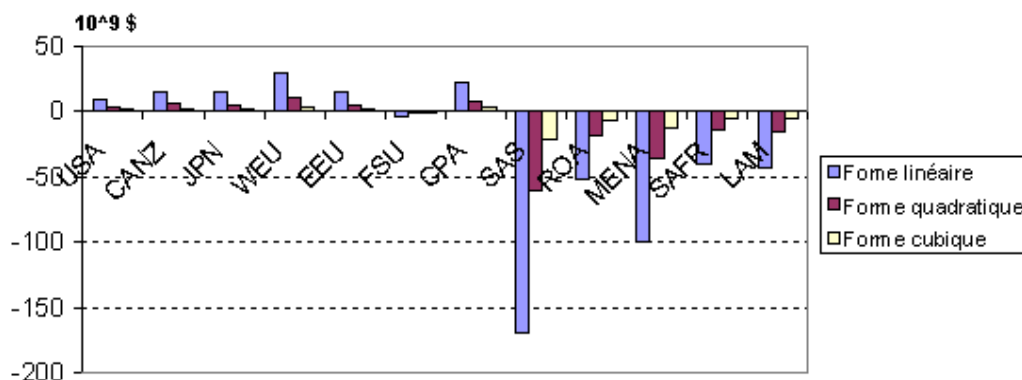


Figure 23 : Évaluation des dommages en 2050

L'évaluation des dommages en 2050 met en évidence une forte hétérogénéité dans la répartition spatiale des dommages. Les pays en développement sont le plus fortement touchés, en particulier les pays d'Asie (hors CPA), l'Afrique et l'Amérique Latine. Quant aux pays du Nord ainsi que la Chine, les impacts du changement climatique semblent plutôt se traduire en gains (USA, Canada, Japon et Europe). Comme nous le verrons dans la partie suivante, cette hétérogénéité sera un facteur déterminant dans le calcul des transferts nécessaires à l'atteinte de l'optimum.

Lorsque nous passons d'une forme linéaire, à une forme quadratique puis à une forme cubique, l'évaluation des dommages en 2050 devient de plus en plus faible pour l'ensemble des régions. En fait l'utilisation de fonctions puissances pour le calcul des dommages traduit des phénomènes d'accélération sur le plus long terme. Ce jeu de fonctions permet de tester dans notre analyse la robustesse des résultats face à l'incertitude sur l'ampleur de la facture des dommages à l'horizon 2050.

## 2.2. Prix du carbone

Avec les hypothèses de stabilisation adoptées, le scénario A1 (IIASA) et les courbes de coûts adaptées d'EPPA, nous avons calculé quelle serait le profil d'évolution du prix de la tonne de carbone.

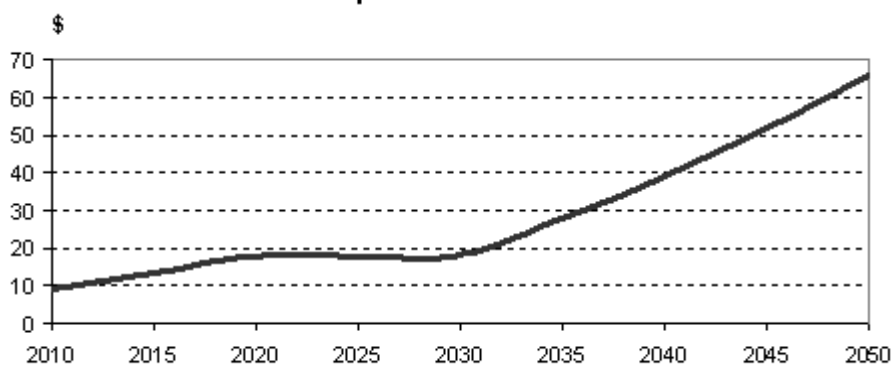


Figure 24 : évolution du prix du carbone

Cette courbe fait apparaître trois phases :

- Entre 2010 et 2020 où l'effort demandé à l'ensemble des régions est légèrement croissant, ce qui se traduit par une croissance modérée du prix de la tonne de carbone de 10 à 18 \$.
- Entre 2020 et 2030, l'effort se stabilise et le prix stagne autour de 18 \$.
- Après 2030, l'effort demandé s'accroît, le prix augmente finalement rapidement et passe de 18 à plus de 60 \$ en 20 ans.

Par rapport à l'ensembles des scénarios étudiés dans le chapitre 2, nous nous situons ici dans un scénario de prix modéré du carbone.

### 2.3. Règles d'allocation usuelles et contrainte de non-redistribution

Nous reprenons ici six règles analysées dans le chapitre 2 (Per Capita, Contraction et Convergence, grandfathering, multicritères, Jacoby, Proposition brésilienne) et comparons les transferts qui en découlent avec les transferts obtenus en observant une règle de non-redistribution du revenu entre les régions. Tout d'abord, si l'on exclut les dommages de l'analyse, aucune des règles ne semble correspondre à l'allocation respectant la non-redistribution du revenu mondial (Figure 25). Nous rappelons ici que cette référence de non-redistribution découle de la condition BLS de fourniture optimale d'un bien public, analysée au chapitre 3. Par exemple, les règles d'allocation par tête (PC et CC) induisent en général des transferts très larges qui correspondent à une importante redistribution du Nord vers le Sud. Au contraire les règles indexées sur les émissions passées et avec entrée immédiate des PED en 2012 (sans seuil) correspondent à un transfert du Sud vers le Nord en 2050. Schématiquement les transferts optimaux sont positifs pour les pays ayant des courbes de coûts marginaux très plates (exportateurs de quotas), et négatifs pour les autres (importateurs de quotas), mais les ordres de grandeur de ces transferts optimaux restent très inférieurs aux résultats impliqués par les différentes règles.

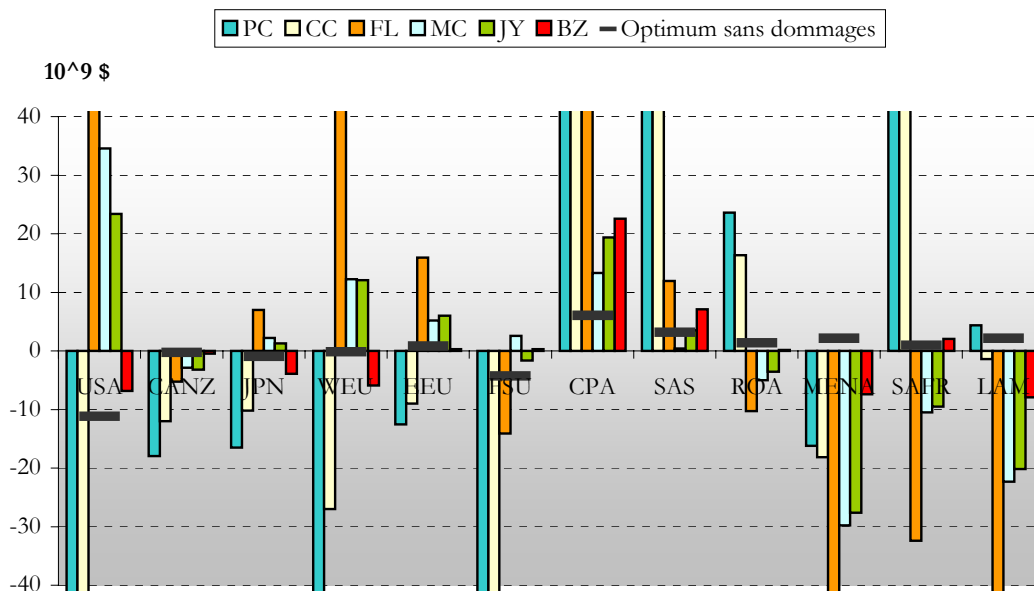


Figure 25 : transferts issus des règles d'allocation et transferts optimaux sans dommages (2050)

Si nous incluons les dommages dans l'analyse, le schéma des transferts optimaux change radicalement. Premièrement, l'ampleur des transferts optimaux est beaucoup plus grande, car la facture totale, incluant dépenses d'abattement et dommages, est elle-même d'un autre ordre. Le schéma global s'accroît dans le sens de transferts du Nord vers le Sud. Les régions de l'annexe I, qui étaient neutres ou peu acheteurs de permis dans le cas sans dommages, sont maintenant censés être de larges acheteurs de permis, de telle sorte que les revenus des permis revendus par les régions hors annexe I, hormis CPA, compensent leurs dommages élevés. Les montants de transferts en jeu sont comparables à ceux mobilisés par les règles d'allocation par tête, et supposent donc de larges quantités d'air chaud. On bute là contre un nœud de problèmes : il n'est pas possible de respecter ensemble les deux règles pragmatiques énoncées dans le chapitre précédent : ni redistribution générale des revenus, ni allocation d'air chaud.

Notons dans la Figure 26 le cas particulier de la région CPA (Chine principalement), qui vient du fait qu'elle fait partie des régions qui pourraient bénéficier des dommages climatiques, d'après l'évaluation de Mendelsohn. . Avantagée par le climat, elle doit donc participer aux compensations des pays qui ne le sont pas.

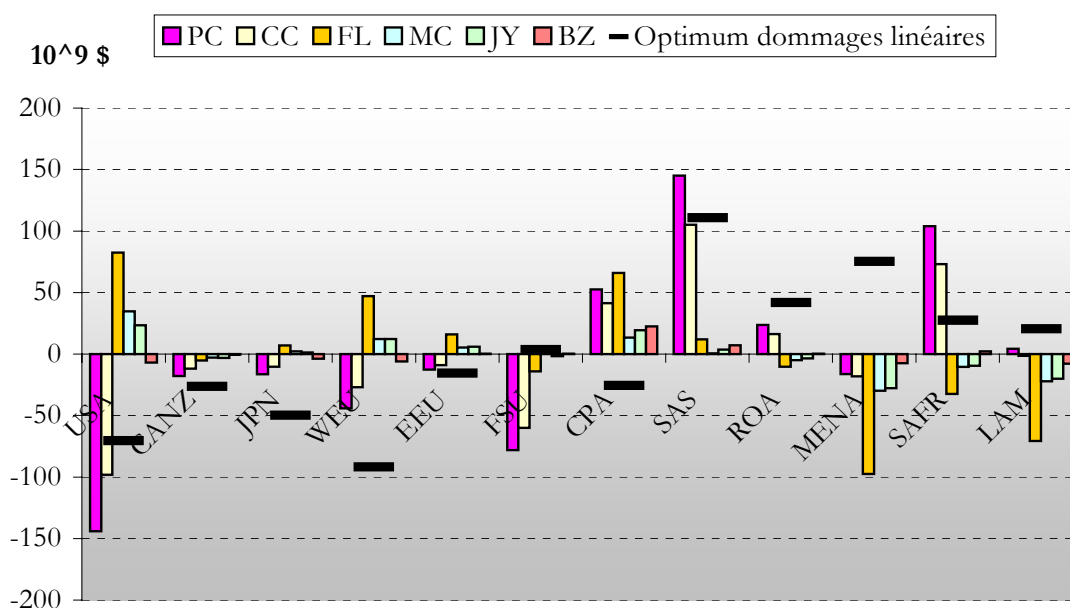
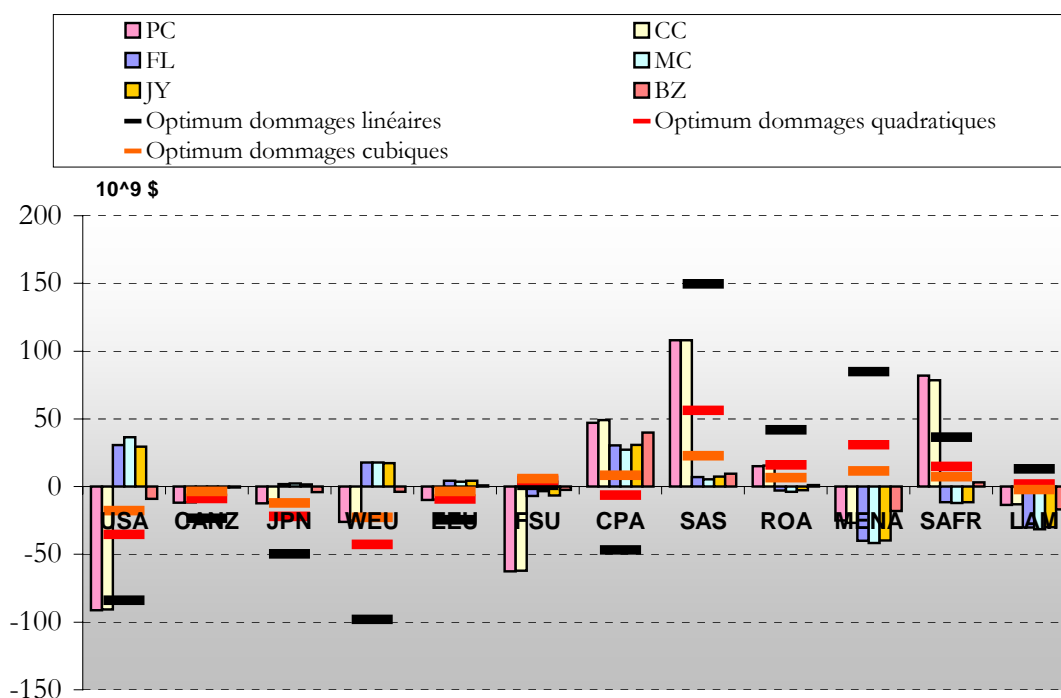


Figure 26 : transferts issus des règles d'allocation et transferts optimaux avec dommages (2050)<sup>31</sup>

Si nous modifions la forme des fonctions de dommages, cela revient à modifier l'ampleur des dommages à 2050, le point de calibrage commun étant la valeur des dommages pour une augmentation de 2°C en 2100. Les fonctions quadratiques et cubiques conduisent donc à des figures moins contrastées que la figure précédente. Cela a bien sûr un impact très fort sur l'ampleur des transferts, mais ne change pas le sens des transferts et la répartition des « vendeurs » et des « acheteurs ».

<sup>31</sup> Attention, l'échelle n'est pas la même que pour le graphique précédent.



**Figure 27 : Sensibilité des transferts à la forme de la fonction de dommages**

Pour la région CPA, les coûts d'abattement l'emportent sur les gains et la part du fardeau mondial induits par le changement climatique. Les transferts deviennent donc positifs dans le cas d'un fonction de dommages cubique.

Pour l'Amérique Latine (LAM), les dommages régionaux ne compensent plus la part du fardeau mondial qu'ils doivent supporter. Les transferts deviennent négatifs dans le cas d'un fonction de dommages cubique.

Pour les autres régions, les transferts sont simplement diminués.

Un point crucial est qu'aucune des règles qui sont ou ont été « sur la table » des négociations ne correspond aux transferts correspondant à la règle de non-distribution et l'évaluation des dommages que nous avons rapporté. Nous avons par ailleurs testé la robustesse de ces résultats aux scénarios futurs. Comme la répartition des revenus change selon les scénarios, le partage de la facture totale change lui aussi. Le prix du carbone et le montant total des dépenses d'abattement change aussi selon le scénario. Mais dans le cas où les dommages en 2050 dépassent assez largement le fardeau des réductions d'émissions, ce qui arrive par exemple dans notre exemple des dommages linéaires pour la plupart des régions, l'impact du scénario est plus faible que l'impact des dommages dans la distribution de la facture et ne change pas les conclusions. La sensibilité des résultats à l'incertitude sur les dommages est plus élevée.

## 2.4. Transferts et acceptabilité

Dans notre modèle, il existe trois sources de différenciation régionale:

- Hétérogénéité dans les coûts d'abattement ( $A_{rt}$ ).
- Hétérogénéité dans la répartition régionale des dommages ( $D_{rt}$ ).
- Hétérogénéité dans la répartition des richesses et donc dans la répartition du fardeau mondial suivant les poids d'agrégation ( $(\text{PIB}_{rt}/\text{PIB}_{\text{tot}} * (\text{Fardeau mondial}))$ ).

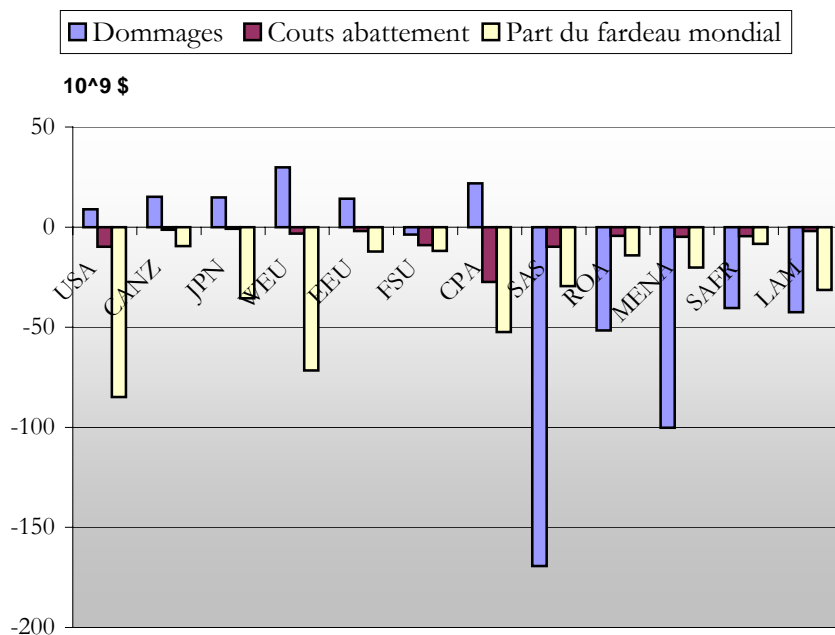
Ces trois hétérogénéités impliquent de larges transferts sur le marché des quotas. La Figure 28 montre d'où viennent ces transferts : pour respecter le partage du fardeau mondial correspondant aux poids de Negishi « adaptatifs » (barres claires), il est nécessaire de modifier considérablement le schéma de répartition de la facture incluant les coûts bruts d'abattement et les dommages. La supposition qui est sous-jacente à l'utilisation des poids de Negishi est l'optimalité de la répartition de référence des richesses. Sous nos hypothèses de fonction d'utilité, cela revient à pondérer chaque région proportionnellement à sa richesse. Ces poids sont donc censés refléter les pouvoirs de négociation des différentes régions. Leur utilisation dans la recherche d'une « règle de référence » semble donc légitime pour nous mener sur le terrain du réalisme politique. Nos simulations montrent finalement qu'en respectant la convention de non-**redistributions** des richesses mondiale à l'occasion de la lutte contre le changement climatique, les **transferts** ex post peuvent être très élevés.

Région	Transferts
USA	Entre -17 et -84 milliards de \$
Europe de l'Ouest	Entre -22 et -98 milliards de \$
Asie du Sud-Est	Entre +22 et +150 milliards de \$
Afrique du Nord et Moyen Orient	Entre +11 et +84 milliards de \$
Flux totaux	Entre 62 et 327 milliards de \$

A titre de comparaison, l'Aide Publique au Développement (APD) du Comité d'Aide au Développement (CAD<sup>32</sup>) s'est élevée à 68.5 milliards de dollars en 2003.

Nous voyons donc apparaître de fortes **sources d'opposition**. De la part des pays du Nord qui ne sont pas prêts à accepter ces larges compensations des dommages que subissent les pays du Sud., et ce d'autant plus que ces compensations sont permises, dans notre modèle, par des allocations massives d'air chaud. Ces allocation d'air chaud, droits d'émissions excédentaires immédiats, sont alors permises au nom de la compensation des dommages futurs non immédiatement tangibles. Mais le point important à souligner, en dépit des larges incertitudes portant sur les dommages du changement climatique reste qu'il est très différent de penser l'acceptabilité du régime futur en termes de **partage du fardeau des réductions d'émissions, partage du fardeau total ou de transferts de compensations des dommages**. En utilisant des poids « qui apparaissent comme politiquement acceptables », on débouche sur des transferts inacceptables.

<sup>32</sup> Le CAD est la principale instance chargée, à l'OCDE, des questions relatives à la coopération avec les pays en développement. Les 23 membres sont : l'Australie, l'Autriche, la Belgique, le Canada, le Danemark, la Finlande, la France, l'Allemagne, la Grèce, l'Irlande, l'Italie, le Japon, le Luxembourg, les Pays-Bas, La Nouvelle-Zélande, la Norvège, le Portugal, l'Espagne, la Suède, la Suisse, le Royaume Uni, les Etats-Unis et la Commission de la Communauté Européenne. Source : [www.oecd.org](http://www.oecd.org).



**Figure 28 : coûts d'abattement, dommages et fardeau mondial pour des dommages linéaires**

La discussion menée dans ce chapitre fait émerger plusieurs commentaires. Tout d'abord, l'exemple numérique présenté ici a valeur de démonstration des changements de point de vue liés à l'introduction des dommages potentiels dans l'analyse des régimes futurs. Mais les incertitudes très larges qui caractérisent les dommages, tant à propos de leur niveau, de leur distribution temporelle que de leur répartition géographique, ne permettent pas d'accorder du crédit en particulier à l'évaluation que nous avons retenue pour l'exercice. Il n'est donc pas concevable, par exemple, de définir une règle de répartition *ex ante* à partir de ces évaluations de dommages et d'une règle de décision collective.

Par contre, cette discussion fait émerger le débat sur les compensations liées à la distribution des dommages climatiques. Les compensations peut répondre à au moins trois exigences :

- les responsabilités communes mais différenciées servent de base à l'argument selon lequel que les pays dont les émissions cumulées sont plus élevées devront compenser les pays les plus vulnérables et les plus touchés par les dommages ainsi provoqués (cf. argumentaire de la proposition brésilienne).

- le respect d'une règle de maximisation de bien-être collectif, sous contrainte de non-redistribution des richesses, se révèle en fait être une contrainte pour les pays développés qui courent le risque de devoir compenser les pertes dues aux dommages des pays en développement.

- les risques de propagation des chocs importants des pays les plus touchés vers le reste de l'économie mondiale peuvent justifier des compensations visant à limiter les dommages qui surviennent malgré la réduction des émissions.

Il n'est pas évident que l'intégration des compensations dans le système d'allocation des quotas soit une « bonne » idée du point de vue de la négociation. en effet les incertitudes liées aux dommages se cumulent à celles liées au prix du carbone futur, pour rendre la négociation des compensations particulièrement ardue. Les exercices de simulation de la distribution de la facture climatique globale ont donc plus vocation à souligner comment la prise en compte des dommages dans cette facture change le regard sur l'acceptabilité des différents régimes possibles, qu'à faire émerger la proposition d'une règle d'allocation qui aplanirait les inégalités de fardeau global. Comme nous l'avons signalé plus haut, une telle

règle consisterait en fait à distribuer des quantités importantes d'air chaud aux pays très affectés par les dommages.

Enfin, l'allocation des quotas et les transferts de compensation correspondent à des chronogrammes différents, si bien qu'un calcul actualisé masque des problèmes d'acceptabilité importants. Il est probable que les compensations importantes ne seront acceptables par les opinions publiques des pays émetteurs de ces compensations que lorsque les dommages auront eu lieu, et non de nombreuses années auparavant. Il semble donc peu crédible d'allouer pendant plusieurs périodes des montants d'air chaud généreux à titre de compensation pour des dommages futurs dont l'ampleur est trop incertaine.





## CONCLUSION

---

Le point central examiné dans ce rapport est de clarifier les conditions selon lesquelles on pourrait éviter que les préoccupations d'équité ne constituent un obstacle majeur à l'émergence d'un compromis sur le régime climatique futur. La perception de l'inégalité des droits et obligations pourrait en effet miner l'acceptabilité des accords sur les politiques climatiques, même dans un cas où leur coût absolu resterait limité.

On peut dégager de ce rapport deux ensembles de conclusions et quelques indications sur l'orientation future des négociations.

Le premier ensemble de conclusions porte sur les fondamentaux économique de la négociation, dans un cadre coût-efficacité où l'objectif environnemental est donné. Nous avons vu, surtout au cours du premier chapitre, qu'un des obstacles majeurs à l'émergence d'un compromis sur le régime futur est le fait que les négociateurs doivent s'entendre sur des objets – notamment la définition d'une règle d'allocation des quotas – dont ils ne peuvent en fait apprécier les conséquences économiques réelles. On montre en effet que, si les règles peuvent toutes être adossées à un principe d'équité, une grande distance subsiste cependant entre l'image suggérée par ces principes, ces règles *ex ante* d'une part (par exemple, une attention prioritaire aux coûts d'une renégociation du contrat social, pour les règles de grandfathering, ou une exigence d'égalité des droits et devoirs dans le cas *per capita*) et leurs conséquences *ex post* d'autre part. En effet on a vu qu'à la fois les échanges des quotas et les larges incertitudes autour de la croissance économique future et des coûts d'abattement fragilisent toute évaluation *ex ante*.

Nous montrons en fait, dans le deuxième chapitre, l'importance de ces incertitudes sur le comportement du marché de quotas à partir des différentes règles testées et sur les préférences régionales parmi ces règles, en insistant spécifiquement sur l'incertitude autour des scénarios futurs. Nous avons fait apparaître plusieurs points non triviaux :

- Le report des engagements contraignants pour certains pays en développement, via un seuil de richesse par tête par exemple, comporte des risques d'instabilité dynamique du prix du carbone, dans les périodes suivantes, à chaque vague d'entrée de nouveaux PED. De plus, l'incertitude sur les scénarios de croissance des PED se reporte sur la date d'occurrence de ces instabilités.
- L'entrée de tous les PED dans le régime contraignant dès 2012 permet de diminuer le prix du carbone et le coût total d'une contrainte d'émissions donnée, mais cette entrée immédiate n'est favorable aux PED qu'à condition de leur garantir des transferts importants, via des allocations de quotas généreuses, voire excédentaires (hot air). Il y a donc là un arbitrage nécessaire pour les pays déjà impliqués dans le régime de Kyoto, entre une contrainte plus légère au prix de transferts importants vers les PED ou un prix du carbone plus élevé avec plus de réductions domestiques.
- Les incertitudes sur les scénarios se répercutent à chaque période sur le niveau absolu du prix du carbone, qui a lui même un effet multiplicateur sur l'ordre de grandeurs des transferts et les coûts finaux des engagements.
- Malgré ces incertitudes, les préférences régionales parmi les règles testées semblent relativement robustes car elles restent assez polarisées (par exemple les USA auraient une préférence claire pour le grandfathering, les pays européens privilégieraient l'entrée immédiate des PED dans une règle de contraction et convergence et rejoindraient en cela la majorité des PED). Mais en fait cette observation a priori rassurante n'est pas conservée lorsqu'on compare les préférences de court-terme – lorsque les gouvernements ne prennent leur choix qu'en fonction du bilan attendu de la période 2012-2017 – et celles de long-terme – les régions s'engageant pour une règle stable jusqu'en 2050, et la décision dépendant alors du bilan actualisé sur 2012-1050. Ceci est particulièrement frappant pour

certains pays industrialisés (par ex. Europe de l'ouest), qui délaissent la règle de contraction et convergence préférée à court-terme parce qu'elle inclut tous les PED dès 2012 mais implique des transferts considérables lorsque la convergence des allocations par tête devient très contraignante.

Ces simulations numériques soulignent les problèmes de cohérence dynamique des choix des négociateurs. Si leurs conclusions sont robustes, et nous le pensons, elles signifient qu'on ne peut dégager d'image claire de coalitions potentielles qui soient stables sur la durée, robustes à l'incertitude et propres à faire émerger un consensus. Au vu de l'ampleur des incertitudes, de leur propagation en chaîne sur la date d'entrée des PED, le profil dynamique ainsi que le niveau absolu du prix des quotas, les transferts monétaires entre régions et les coûts finaux du régime, des instruments de sécurité additionnels – prix plafonds, régimes différenciés – semble nécessaires pour éviter l'échec d'un système d'allocation qui impliqueraient des contraintes *ex post* non acceptables par certaines Parties.

Cet éclairage fort pessimiste permet de préciser les fondamentaux économiques de la négociation, mais n'apporte que peu d'éclairage sur les pistes de compromis.

Ce constat nous a incité à adopter ensuite un point de vue normatif, à la recherche d'un point d'équilibre, comme si la recherche du compromis était confiée à un planificateur bienveillant. mais en demandant à ce planificateur, cette fois, d'intégrer dans la maximisation du bien-être collectif les dommages dus au changement climatique, qui constituent la motivation ultime des gouvernements pour entreprendre des actions de réduction des émissions. Les développements du troisième chapitre font alors émerger deux paramètres importants dans le calcul d'un partage du fardeau « optimal » :

- **L'anticipation de l'évolution future des rapports de force géopolitiques**, typiquement soit en privilégiant le statu quo ou bien en prenant l'hypothèse d'une inévitable révision des pouvoirs de négociation, par exemple suite à un rattrapage économique rapide de la Chine ;
- **le mode de prise en compte des dommages climatiques**, qui peuvent être mutualisés ou non, selon que les décideurs s'attendent à des effets de propagation importants ou subissent des pressions politiques majeures.

Par rapport à la conclusion précédente, cette discussion permet de relativiser le poids à donner aux questions d'équité. En effet, le point important est que, numériquement, même sous une hypothèse a priori conservatrice de non-redistribution des richesses à l'occasion des politiques climatiques, les deux paramètres ci-dessus ont un impact important sur le niveau absolu de l'action et sur les possibilités d'accords, ce qui relativise la pertinence d'un débat posé uniquement en termes de partage du fardeau.

De plus, nous avons montré que le compromis qui minimise les risques d'instabilité dynamique et qui maximise les chances d'accord correspond aux hypothèses selon lesquelles les rapports de force évoluent en fonction du poids économiques des Parties et les dommages sont mutualisés dans une solidarité « universelle ». Cette dernière hypothèse en particulier permet de garantir une plus grande robustesse de l'accord face aux larges incertitudes qui entourent les évaluations actuelles des dommages potentiels du changement climatique.

La composante optimiste de cette conclusion doit malheureusement être relativisée par le fait que sa traduction en règle pragmatique reste difficile. On montre en fait dans le chapitre 4 que l'inclusion des dommages dans l'analyse ne rend pas les termes du compromis plus aisés à trouver, d'une part parce que les incertitudes supplémentaires liées aux dommages, indépendantes de celles qui sont liées au scénario de référence, élargissent encore l'incertitude qui porte sur la facture totale liée au climat – coûts des

réductions, transferts et dommages – et d'autre part parce qu'introduire les dommages dans le calcul de l'allocation optimale revient à inclure dans le système de quotas l'ensemble des transferts de compensations nécessaires pour contrebalancer la répartition très hétérogène des dommages.

Au vu de ce cheminement, nous serions tentés d'affirmer qu'il est illusoire de s'attendre à un accord simple sur une formule de répartition des quotas *ex ante*. Pourtant le choix d'une règle d'allocation stable sur le long-terme, associée à des mécanismes de sûreté économique, est techniquement nécessaire pour que puisse émerger aux yeux des agents économiques un signal suffisamment clair, robuste, sécurisé et stable dans le temps.

Finalement, la problématique du *Burden Sharing* place la négociation dans un espace de négociation relativement étroit où la répartition des quotas est facilement interprétable comme un jeu à somme nulle, surtout si un plafond d'émissions est fixé de manière indépendante. Cette posture peut rapidement être une impasse pour les négociations, et en particulier mettre en péril la poursuite de l'objectif d'une stabilisation des concentrations de gaz à effet de serre, nécessitant l'inclusion à court-terme des États-Unis et des principaux PED dans un régime de maîtrise des émissions. Deux changements de posture intellectuelle pourraient permettre de se dégager de ce blocage rhétorique :

- **Repenser le lien entre climat et développement**, en inversant la logique de pensée et de négociation selon laquelle le développement est un bénéfice ancillaire de la lutte contre le changement climatique, c'est à dire en remplaçant l'impératif de développement au premier rang et intégrer la nécessité de systèmes économiques pauvres en carbone pour rendre ce développement viable. Le système des permis négociables est alors reconsidéré, comme un outil parmi d'autres, qu'il est souhaitable d'appliquer partiellement à un sous-ensemble de pays et de secteurs adaptés, en compléments d'autres paquets de mesures. Cette attitude est d'ailleurs au centre de travaux communs en cours avec des centres de recherche partenaires au Brésil et en Inde (Hourcade, Shukla, Mathy, 2005), dont certains sont intégrés dans un autre programme de travail actuellement financé par l'ADEME sous l'égide du programme GICC-2.
- Éviter d'inclure dans l'allocation initiale des quotas l'ensemble des préoccupations liées au changement climatique, tels que les compensations liées aux dommages climatiques, ou même toute idée de redistribution de revenus par rapport à une situation économique jugée inégalitaire. Car une telle attitude fragilise considérablement la recherche d'un compromis, le rendant plus vulnérable aux incertitudes liées aux dommages et à la croissance économique future. Elle induit aussi des répartitions initiales de quotas très éloignées des émissions réelles effectives après fonctionnement du marché, autrement dit elle confie aux transferts marchands de quotas la tâche de compenser financièrement les dommages ou les inégalités de développement actuelles. Il est plus souhaitable d'engager des réflexions parallèles sur la mise en place de mécanismes disjoints du marché de quotas concernant les compensations des dommages au fur et à mesure de leur occurrence, les dépenses d'adaptation voire l'aide au développement. Ceci vient résolument appuyer la mise en garde du point précédent contre l'utilisation globale et exclusive de l'outil des permis négociables.



## BIBLIOGRAPHIE

---

- Travaux de synthèse sur le sujet

ALDY, Joseph E., John ASHTON, Richard BARON, Daniel BODANSKY, Steve CHARNOVITZ, Elliot DIRINGER, Thomas H. HELLER, Jonathan PERSHING, P.R. SHUKLA, Laurence TUBIANA, Fernando TUDELA and Xueman WANG (2003): *Beyond Kyoto: Advancing the International Effort against Climate Change*, Pew Center on Global Climate Change, December.  
[http://www.pewclimate.org/global-warming-indepth/all\\_reports/beyond\\_kyoto/index.cfm](http://www.pewclimate.org/global-warming-indepth/all_reports/beyond_kyoto/index.cfm)

BAUMERT, Kevin A. (ed.) (2002): *Building on the Kyoto Protocol: Options for Protecting the Climate*, World Resources Institute, October.  
[http://climate.wri.org/pubs\\_pdf.cfm?PubID=3762](http://climate.wri.org/pubs_pdf.cfm?PubID=3762)

HÖHNE, Niklas, Carolina GALLEGUILLOS, Kornelis BLOK, Jochen HARNISCH and Dian PHYLIPSEN (2003): *Evolution of Commitments under the UNFCCC: Involving Newly Industrialized Economies and Developing Countries*, Research Report 201 41 255, UBA-FB 000412, German Federal Environmental Agency, Berlin Germany. February 2003.  
<http://www.umweltbundesamt.org/fpdf/2246.pdf>

PHILIBERT Cédric and Stéphane WILLEMS (2003): “*Evolution of Mitigation Commitments: Some Key Issues*,” background document presented at Annex I Expert Group Seminar on Future Developments under the UNFCCC, Paris, 25 September 2003, COM/ENV/EPOC/IEA/SLT(2003)3.  
<http://spider.iea.org/envissu/files/mitigation.pdf>

STOREY, Mark (2002): *Kyoto and Beyond: Issues and Options in the Global Response to Climate Change*, Swedish Environmental Protection Agency/Naturvårdsverket, Stockholm.  
<http://www.internat.naturvardsverket.se/documents/issues/climate/report/Kyoto.pdf>

WBGU [The German Advisory Council on Global Change] (2003): *Climate Protection Strategies for the 21st Century: Kyoto and Beyond*, Special Report, Berlin.  
[http://www.wbgu.de/wbgu\\_sn2003\\_engl.pdf](http://www.wbgu.de/wbgu_sn2003_engl.pdf)

- Liste des travaux cités

AGARWAL, A., NARAIN, S., 1991, *Global Warming in an Unequal World, a case of environmental colonialism*, Center for Science and Environment, Delhi.

AZAR, C., 1999. Weight factors in cost-benefit analysis of climate change. *Environmental and Resource Economics* **13**(3), 249-268.

BABIKER M., REILLY J. M., JACOBY H. D., 2000, *The Kyoto protocol and developing countries*, Energy Policy, 28, 525-536.

BARRETT, S., 1992, ‘*Acceptable*’ allocations of tradable carbon emissions entitlements in a global warming treaty, In : *Combating Climate warming*, UNCTAD, Geneva.

BAUMERT, K.A., BHANDARI, R., KETE, N., 1999, *What might a developing country commitment look like ?*, Climate Notes, World Resources Institute, Washington DC.

BERK, M.M., DEN ELZEN, M.G.J., 2001, *Options for differentiation of future commitments in climate policy : how to realize timely participation to meet stringent climate goals ?*, Climate Policy, vol. 1, pp. 465-480.

BERKHOUT, F., HERTIN, J., JORDAN, A., 2002, *Socio-economic futures in climate change impact assessment: using scenarios as 'learning machines'*, Global Environmental change, 12, pp. 83-95.

BLANCHARD, O., CRIQUI, P., TROMMETTER, M., VIGUIER, L., 2000, *Au-delà de Kyoto : enjeux d'équité et d'efficacité dans la négociation sur le changement climatique*, Economie et Prévision, no. 143.

BODANSKY, D., 2001. Bonn Voyage. Kyoto's Uncertain Revival. *The National Interest*, Fall, 45-55.

BRUCE, J., LEE, H., HAITES, E. (eds.), 1996. *Climate Change 1995: Economic and Social Dimensions of Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge.

BYRNE, J., WANG, Y-D., LEE, H., KIM, J., 1998, *An equity- and sustainability-based policy response to global climate change*, Energy Policy, vol. 26, no. 4, pp. 335-343.

CAZORLA, M., TOMAN, M., 2000, *International Equity and Climate Change policy*, Resources for the Future, Climate Issue Brief no. 27.

CHAO, H.-P., PECK, S., 2000. Greenhouse gas abatement: how much? and who pays? *Resource and Energy Economics* 22(1), 1-20.

CHICHILNISKY, G., HEAL, G., STARRETT, D., 2000. Equity and efficiency in environmental markets: global trade in carbon emissions. In CHICHILNISKY, G., HEAL, G. (eds.). *Environmental markets*, Columbia University Press, pp.46-67.

CICERO-ECN, 2001, *Sharing the burden of greenhouse gas mitigation*, Final report of the joint CICERO-ECN project on the global differentiation of emission mitigation targets among countries.

CLAUSSEN, E., MCNEILLY, L., 1998, *Equity and global climate change. The complex elements of global fairness*, Pew Center on global Climate Change.

COLOMBIER, M., 1998, *Critères de différenciation des engagements en matières d'émissions de gaz à effet de serre*, Rapport pour la Mission Interministérielle sur l'effet de serre, lettre de commande 99-98, 65 p.

DEN ELZEN, M., BERK, M., SCHAEFFER, M., OLIVIER, J., HENDRIKS, C., METZ, B., 1999, *The Brazilian Proposal and other Options for International Burden Sharing : an evaluation of methodological and policy aspects using the FAIR Model*, RIVM Report no. 728001011.

ECN website : [http://www.ecn.nl/unit\\_bs/kyoto/burden/main.html](http://www.ecn.nl/unit_bs/kyoto/burden/main.html)

ELLERMAN, A., D., JACOBY, H., D., DECAUX, A., 1998, *The Effects on Developing Countries of the Kyoto Protocol and CO<sub>2</sub> Emissions Trading*, Report #41, Joint Program on the science and policy of global change, MIT.

GODARD, O., 1999, *La dimension de l'équité dans les négociations sur le climat*, Les Cahiers de Global Chance, , vol. 12, nov. 1999, pp. 8-14.

GROENENBERG, H., PHYLIPSEN, D, BLOK, K., 2000, *Differentiating commitments world wide : global differentiation of GHG reductions based on Triptych approach – a preliminary assessment*, Energy Policy, vol. 29, pp. 2001-1030.

GRUBB, M., 1989, *The greenhouse effect : negotiating targets*, Royal institute of International affairs, London.

GRUBB, M., SIBENIUS, J., MAGALHAES, A., SUBAK, S., 1992, *Sharing the burden*, In : *Confronting Climate Change : Risks, Implications and Responses*, I.M. Mintzer (ed.), Cambridge University press, Cambridge.

- GRUBB, M., VROLIJK, C., BRACK, D., 1999. *The Kyoto protocol, a guide and an assessment*, Royal Institute of International Affairs, London.
- GRÜBLER, A., NAKICENOVIC, N., 1994, *International Burden sharing in greenhouse gas reductions*, IIASA, Laxenburg.
- GUESNERIE, R., 1995. The genealogy of modern theoretical public economics: from first best to second best. *European Economic Review* **39**(3/4), 353-381.
- HOURCADE, J.-C., 1994. Economic issues and negotiation on global environment: some lessons from the recent experience on greenhouse effect. In CARRARO C. (Ed.) *Trade Innovation and Environment*. Kluwer Academics Publishers, Dordrecht, pp.385-405.
- HOURCADE, J.-C., RICHEL, R., ROBINSON, J., 1996. Estimating the costs of mitigating greenhouse gases. In BRUCE, J., LEE, H., and HAITES, E. (eds.). *Climate Change 1995: Economic and Social Dimensions of Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, pp.263-296. 33
- HOURCADE, J.-C., 2000. Le climat au risque de la négociation internationale. *Le Débat*.
- IPCC, 2001c, *Working group III : Mitigation*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- JACOBY, H.D., SCHLAMENSEE, R., WING, I. S., 1999, *Toward a Useful Architecture for Climate Change Negotiations*, Report no.49, Joint Program on the Science and Policy of Global Change, MIT.
- JANSEN, J.C., BATTJES, J.J., SIJM, J.P.M., VOLKERS, C.H., YBEMA, J.R., 2001, *The multi-sector convergence approach, A flexible framework for negotiating global rules for national greenhouse gas emissions mitigation targets*, CICERO Working Paper 2001:4, ECN-C—01-007.
- KAWASHIMA, Y., 1996, *Differentiation on QELROs according to national circumstances : introduction to equality criteria and reduction excess emissions*, paper presented at 'Informal workshop on QELROs', 28/02/96, Geneva.
- KRAUSE, F., BACH, W., KOOMEY, J., 1989, *Energy policy in the Greenhouse*, vol. 1 : From warming fate to warming limit : benchmarks for a global climate convention, International Project for Sustainable Energy Paths, El Corrito.
- LECOCQ, F., 2000, *Distribution spatiale et temporelle des coûts de politiques publiques sous incertitudes : théories et pratique dans le cas de l'effet de serre*, thèse de doctorat ENGREF.
- LECOCQ, F., CRASSOUS, R., 2003. International Climate Regime beyond 2012: Are Quota Allocation Rules Robust to Uncertainty? *Policy Research Working Paper 3000*. World Bank, Washington DC.
- MCCARTHY, J.J., CANZIANI, O.F., LEARY, N.A., DOKKEN, D.J., WHITE, K.S. (Eds), 2001. *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge University Press, Cambridge.
- METZ, B., 2000, *International Equity in climate change policy*, Integrated assessment 1, pp. 111-126..
- NAKIĆENOVIC, N., SWART, R. (Eds), 2000. *Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change on emission scenarios*. Cambridge University Press, Cambridge.
- NEGISHI, T., 1960. Welfare economics and existence of an equilibrium for a competitive economy. *Metroeconomica* **12**, 92-97.
- NEUMAYER E., 2000, *In defence of historical accountability for greenhouse gas emissions*, Ecological economics, 33, 185-192.

NEUMAYER, E., 2002, *Can natural factors explain any cross-country differences in carbon dioxide emissions ?*, Energy Policy, vol. 30, pp. 7-12.

NORDHAUS, W.D., YANG, Z. A Regional Dynamic General-Equilibrium Model of Alternative Climate-Change Strategies. *American Economic Review* **86**(4), 741-765.

OECD, 1993. *International economic instruments and climate change*. OECD, Paris.

PEPPER, W., BARBOUR, W., SANKOVSKI, A., BRAATZ, B., 1998, *No-policy greenhousegas emission scenarios: revisiting IPCC 1992*, Environmental Science and Policy, no. 1, pp. 289-312.

PHILIBERT, C., PERSHING, J., 2001, *Considering the options : climate targets for all countries*, Climate policy, vol. 1, pp. 211-227

PIZER, W., A., 1997, *Price vs. Quantities revisited : the case of climate change*, Resources for the Futures, discussion paper #98-02.

PIZER, W., A., 2000, *Regulating Stock Externalities Under Uncertainty*, Discussion Paper 99-10, Resources for the Future, Washington DC, February

PIZER, W.A., 2002, Combining Price and Quantity Control to Mitigate Global Climate Change, *Journal of Public Economics*, vol. 85, n° 3

PHYLIPSEN, G.J.M., BODE, J.W., BLOK, K., 1998, *A triptych approach to burden differentiation; GHG emissions in the European bubble*, Energy Policy, vol. 26, no. 12, pp. 929-943.

RAWLS. J., 1971. *A theory of justice*. The Belknap Press of Harvard University Press, Cambridge.

RIDGLEY M. A., 1996, *Fair sharing of greenhouse gas burdens*, Energy Policy, vol. 24, no. 6, 517-529.

REILLY, 2002, Intervention au colloque *Managing fragmented regimes*, co-organisé par le CIRED et le MIT , à Paris, Mai 2002. Disponible sur <http://www.centre-cired.fr>

REINER, D.M., JACOBY, H.D., 1997, *Annex I Differentiation Proposals : Implications for Welfare, Equity and Policy*, Joint Program on the Science and Policy of Global Change, MIT, Report no 27.

RINGIUS L., TORVANGER A., HOLTSMARK B., 1998, *Can multi-criteria rules fairly distribute climate burdens – OECD results from three burden sharing rules*, Energy Policy, vol. 26, 10, 777-793.

RINGIUS, L., TORVANGER, A., UNDERDAL, A., 2000, *Burden Differentiation : Fairness Principles and Proposals, The joint CICERO-ECN project on sharing the burden of greenhouse gas reduction among countries*, working paper 1999:13.

ROSE, A., 1992, *Equity considerations of tradable carbon emissions entitlements*, In : Combating Climate warming, UNCTAD, Geneva.

ROSE, A., STEVENS, B., EDMONDS, J., 1998, *International Equity and differentiation in Global Warming Policy*, Mimeo, The Pennsylvania State University, California Energy Commission, and Pacific Northwest Laboratory, 31 juillet.

SANDLER, T., SMITH, K.V., 1976. Intertemporal and intergenerational Pareto efficiency. *Journal of Environmental Economics and Management* **2**, 151-159.

SCHELLING, T., 1995. Intergenerational discounting. *Energy Policy* **23**(4/5), 395-401.



SEN, A. K., 1987. *On ethics and economics*. Basil Blackwell Publishers, Oxford.

SEN, A.K., 1992, *Inequality reexamined*, Oxford University Press.

TORVANGER, A., RINGIUS, L, 2000, *Burden differentiation : criteria for evaluation and development of burden sharing rules*, CICERO working paper 2000:1.

TOTH, F., MWANDOSYA, M., et *alii*, 2001. Decision-making Frameworks. In METZ, B., DAVIDSON, O., SWART, R., PAN, J. (Eds.). *Climate Change 2001: Mitigation, Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report to the IPCC*. Cambridge University Press, Cambridge, pp.601-690.

VICTOR, D., 2001, *The collapse of the Kyoto Protocol*, Princeton University Press, Princeton.

WEITZMAN, M., L., 1974, *Prices vs. quantities*. Review of Economic Studies 41(4), 477–491. Newell, R.G. &

WORLD BANK, 2002. *World Development Indicators*. Washington DC.

WORLD BANK, 2003. *Global Economic Prospects*, Washington DC.



### Définition et nature des coûts d'abattement.

Le concept de coût est polysémique et peut recouvrir des réalités économiques très diverses. L'étude du changement climatique et des politiques de réduction des émissions n'échappe pas à ce casse-têtes : les définitions de coûts de réductions sont multiples, comme en témoignent les trois chapitres du rapport [IPCC, 2001c] consacrés à en éclaircir les définitions et les enjeux<sup>33</sup>. Nous pouvons distinguer principalement deux approches d'évaluation des coûts de réduction, qui correspondent à la fois à des définitions et à des méthodes d'évaluation : l'approche *bottom-up*, suivant une logique plus micro-économique et technologique, au niveau de l'acteur – l'état, l'industriel, le consommateur –, et l'approche *top-down*, macroéconomique, qui capte les résultats globaux des multiples actions individuelles à un niveau régional, national ou international.

Dans la perspective *bottom-up*, le coût est défini comme la charge financière directement supportée par l'acteur qui met en œuvre le projet, l'action de réduction. Par exemple, pour un industriel, ce sera le surcoût annualisé de son nouvel équipement « propre » par rapport à un nouvel équipement plus émetteur ; pour un individu, ce pourra être le prix d'un double vitrage ou d'une ampoule plus efficace ; pour un Etat ce pourra être le surcoût total du remplacement d'une centrale au charbon par une centrale au gaz lors de son renouvellement. Habituellement, les coûts *bottom-up* sont présentés sous forme de valeur présente nette totale (NPV pour « net present value »)<sup>34</sup>, et comprennent les coûts d'investissement, de maintenance et d'opération des équipements. L'évaluation d'un coût *bottom-up* nécessite donc une description précise de la technologie, des comportements de consommation relatifs au secteur étudié et aux produits associés. Cela nécessite aussi de passer par l'adoption d'un taux d'actualisation et d'hypothèses sur les coûts d'exploitation futurs. On peut distinguer dans une perspective *bottom-up* trois méthodes d'évaluation des coûts, selon [IPCC, 2001c]:

- au niveau du projet, en effectuant des calculs projet par projet, ou technologie par technologie. Les effets de répercussion dans le secteur et les autres marchés sont négligés. Les actions potentielles dans chaque technologie sont évaluées indépendamment et agrégées pour former un coût total.
- au niveau des secteurs économiques, avec des modèles d'équilibre partiel simulant la meilleure configuration technologique et les changements structurels dans un secteur (Cf. modèles POLES, MARKAL).
- au niveau supérieur d'une économie entière, grâce à des modèles de simulation, qui peuvent produire des sentiers sous-optimaux.

Le coût marginal de réduction fourni par ces méthodes correspond au coût technique de la dernière tonne non-émise.

Dans la perspective *top-down*, le coût marginal de réduction est défini comme le prix implicite résultant d'une contrainte d'émissions correspondante imposée globalement à l'économie. Les modèles requis sont des modèles d'équilibre général, pouvant intégrer parfois des niveaux de détail assez fins sur la technologie ou les différentes formes de capital. Cette méthode est censée prendre en compte,

---

<sup>33</sup> Cf. Chapitre 7, 8 et 9 du rapport cité.

<sup>34</sup> Cf. [Babusiaux,] pour les définitions exactes des calculs de coût d'investissement.

contrairement à une démarche *bottom-up*, les effets d'interactions entre les secteurs (*spillover effects*), les bénéfiques ancillaires, les éventuels dividendes du recyclage des revenus engendrés par la contrainte (taxes ou permis négociables), les conséquences sur la productivité et le travail, etc. Cependant, très souvent, le comportement de ces modèles repose sur des élasticités de substitution ou de consommation, qui ne sont normalement valables qu'à l'équilibre, alors que les contraintes mises en jeu par un objectif d'abattement de 15 à 20 %<sup>35</sup> ne sont plus des modifications à la marge du système économique à l'équilibre. Malgré cette limitation, ces modèles sont très utilisés lorsque le niveau d'agrégation est élevé, les modèles *bottom-up* devenant plus difficiles à mettre en œuvre pour des raisons de complexité croissante et de données non-disponibles. Il est possible de distinguer aussi deux options d'évaluation *top-down* :

- en regardant le prix implicite de la contrainte imposée à l'économie, qui est le multiplicateur de Lagrange (relatif à la contrainte carbone) d'une fonction d'optimisation globale sous contraintes de bien-être collectif ;
- en imposant une taxe sur la ressource, et en observant, dans le sens contraire, le niveau d'abattement obtenu.

A priori ces deux méthodes conduisent à des résultats identiques sur le même modèle d'optimisation, mais la seconde approche peut être appliquée sans fonction de bien-être collective, et en particulier à des modèles de simulation (et non d'optimisation), qui peuvent permettre de représenter des situations sous-optimales plus réalistes.

### **Courbes de coût marginal d'abattement.**

Pour informer le modèle de marché de carbone il est nécessaire de disposer de *courbes* de coûts marginaux d'abattement, lesquelles permettent d'établir une correspondance entre un coût marginal à la tonne de carbone, exprimé en devises par tonne et par an et un niveau d'abattement réalisé, exprimé soit en pourcentage de la référence, soit en tonnes de carbone par an. Dans le cadre de cet exercice nous utilisons des courbes générées par une autre équipe de modélisation, à partir d'un modèle macro-économique. L'utilisation et le sens de ces courbes suscite de nombreuses questions théoriques et méthodologiques que nous ne détaillerons pas ici par souci de simplicité. Par exemple il n'est pas aisé d'établir **le lien entre courbes de coût marginal et scénario de référence**. Il n'est en général pas possible de dissocier une courbe de coût marginal du scénario de référence utilisé dans les calculs. Cependant les données « idéales » dont nous souhaiterions disposer, à savoir une série de couples (courbes de coûts, scénario de référence), n'existe pas en l'état. Il serait nécessaire d'utiliser notre propre modèle macroéconomique global pour produire de telles données, ce qui annihile l'intérêt de la simplicité que nous trouvons dans l'analyse en équilibre partiel. En conséquence, nous utilisons un seul jeu de courbes de coût pour les 23 scénarios. Mais nous restaurons en partie le lien entre trajectoire de référence et courbe de coût en exprimant ces courbes en pourcentage de réduction par rapport à la référence et non pas en niveau absolu de réductions.

Les courbes exprimées en volume d'abattement seront d'abord converties en pourcentage des émissions de référence. L'hypothèse qui justifie cette approximation est en fait que les systèmes énergétiques, économiques et sociaux doivent être assez semblables dans les deux régions. Comme la plupart du temps, il s'agit pour nous de faire correspondre une région et un pays inclus et majoritaire dans cette région (cf. exemple ci-dessus), cette hypothèse ne semble pas absurde. Les erreurs commises dans ce cas sont probablement assez faibles par rapport aux incertitudes globales sur les coûts d'abattement. Néanmoins, l'hétérogénéité géographique des coûts marginaux d'abattement est la pièce maîtresse du

---

<sup>35</sup> les 5% du protocole de Kyoto s'appliquant la référence de 1990, les pourcentages de réduction par rapport au niveau de 2010 peuvent atteindre 20 %.

marché international de permis, c'est elle qui permet d'atteindre un même objectif environnemental global à moindre coût. La dimension géographique doit donc faire l'objet de beaucoup d'attention.

### **Courbes de coûts et simulations multi-périodes.**

Une courbe de coût marginal est relative à une période donnée. Une question naturelle est de s'interroger sur les liens entre les courbes de coût marginal relatives à une même région pour des périodes successives. Les courbes des périodes successives sont susceptibles d'évoluer d'une part à cause d'évolutions pouvant être considérées comme exogènes – comme le progrès technique autonome ou la disparition d'opportunités à bas coût – et d'autre part de changements endogènes, dépendants des actions de réduction entreprises en première période. Nous nous proposons d'aborder ici quelques facteurs de modifications des courbes de coût marginal et d'en discuter l'importance.

#### *Croissance et dilatation des opportunités*

D'une période à la suivante, la croissance économique est associée à une augmentation du capital productif installé, de l'équipement des ménages et parfois de la population. Ces augmentations sont intégrées dans le scénario de référence par rapport auquel le niveau d'abattement est considéré. Ce scénario de référence est un scénario *Business As Usual*, c'est à dire que rien n'est entrepris pour réduire les émissions. Il est tentant d'affirmer que les opportunités de réduction sont « dilatées » par la croissance, c'est à dire que la croissance augmente le volume de réduction possibles à un prix donné : par exemple l'augmentation du nombre d'ampoules peu efficaces en service avec la construction de nouvelles maisons bon marché crée autant de possibilités nouvelles de leur substituer des ampoules à haute efficacité, pour un prix identique (modulo la baisse du prix unitaire due au changement technique, cf. paragraphe suivant). Le sens de l'effet de *dilatation* de la croissance sur une courbe de coût marginal dont l'axe des abscisses (niveau d'abattement) est exprimé en volume de réductions semblerait clair : la courbe sera aplatie, ou autrement dit étirée horizontalement. Mais en fait il est difficile de dire si elle sera étirée avec la même amplitude pour tous les niveaux de prix, ce qui revient à se demander si l'économie subit une homothétie ou si la croissance est hétérogène entre les secteurs. La réponse est rapide : au cours de sa croissance, une économie subit en général des changements structurels, elle n'est pas uniformément dilatée. Il est même possible que, du fait de certains secteurs en récession au sein d'une économie globalement en croissance, dans lesquels les opportunités de réduction à bas coût étaient nombreuses, la croissance soit accompagnée non plus d'un étirement de la courbe de coût mais d'un rétrécissement horizontal pour certains niveaux de prix. En résumé rien ne permet d'affirmer que la modification d'une courbe de coût marginal entre deux périodes, due à l'augmentation globale du volume de l'économie, toutes choses égales par ailleurs, est dans un sens ou dans l'autre.

#### *Changement technique autonome*

Le changement technique dit « autonome » est intégré dans le scénario de référence. Il peut avoir sur les possibilités de réduction des émissions principalement deux effets clairement identifiés : faire émerger de nouvelles solutions techniques, diminuer le coût d'options existantes. L'effet sur la courbe de coût marginal n'est pas clair. En effet, nous pouvons décomposer les effets secondaires de ces deux bienfaits du progrès techniques en deux temps :

- Du fait de la baisse des prix, la courbe est revue à la baisse : tous ses points sont « descendus » verticalement. Grossièrement l'axe des abscisses « monte » d'un cran. Mais à l'extrême gauche de la courbe, près de l'origine, certaines possibilités à bas coût en première période deviennent

rentables en deuxième période (coût négatif ou sans regret) et disparaissent car elles sont alors réalisées dans le scénario de référence<sup>36</sup>, ce qui revient à déplacer l'axe des ordonnées vers la droite jusqu'à ce que la courbe de coût repasse par l'origine. La nouvelle courbe finalement obtenue est-elle plus creuse ou plus pentue que la courbe de la première période ? Avec une courbe originale concave, la pente de la courbe étant croissante, la nouvelle courbe est plus raide que la première, et l'effet d'une baisse « uniforme » des prix est de relever la courbe de coût marginal.

- Il faut rajouter à cela de nouvelles opportunités existant grâce à de nouvelles solutions techniques, qui viennent s'intercaler dans la courbe de coût et limitent le résultat précédent.

Finalement, si l'on assiste à une baisse uniforme des coûts (par exemple -5 \$ par tonne sur toutes les possibilités, quel que soit leur coût marginal), et que les nouveautés techniques sont limitées, l'effet de la baisse des coûts l'emportera et la courbe sera plus redressée à la seconde période.

Les deux premiers points sont uniquement dépendants du contenu du scénario de référence, mais il existe entre les courbes de périodes successives des liens dynamiques liés aux réductions entreprises, autrement dit à l'écartement de la trajectoire réelle par rapport au scénario de référence. Il s'agit de se demander quelle est la *trace* laissée par les abattements d'une période donnée dans les périodes suivantes ? Cette *trace* a au moins quatre composantes :

#### *Changement technique induit.*

Le fait d'entreprendre des actions de réduction pendant la période de  $t$  à  $t+1$  permet d'accélérer l'innovation et les efforts de recherche et développement pour les technologies propres. Cette *induction* est particulièrement difficile à quantifier, et aucun modèle top-down ne fournit encore une description correcte des mécanismes de recherche et développement (cf. [IPCC, 2001c]). L'effet du progrès technique induit peut être décrit comme celui du progrès technique autonome, mais il est difficile de déterminer son sens de manière qualitative.

#### *Modification des comportements.*

De même les projets de réduction menés auprès des consommateurs ou des entrepreneurs, de type incitatifs (comme une taxe sur les transports « sales » ou des aides pour acquérir des équipements plus efficaces), sont aussi susceptibles d'avoir des effets induits. Ceux-ci peuvent être de deux types :

- *le changement des habitudes* : des incitations fortes sur une période de 5 ans pour que les citoyens prennent les transports collectifs peuvent déplacer les habitudes de ces citoyens, et à la période suivante, ceux-ci continueront en partie à garder ces habitudes. Autrement dit, si les incitations cessaient à la période suivante, on ne retournerait pas immédiatement à la situation initiale : une partie des gens auront vendu leur voiture et/ou se seront organisés autour des transports en commun. Économiquement parlant, cela signifie que les incitations auront modifié les élasticités de consommation des individus. Il est probable que l'effet de ce mécanisme sur la courbe de coût sera de diminuer le coût des réductions associées à ces comportements.
- *le report des actions polluantes* : une pénalité infligée à la première période aux acteurs qui effectueraient une action polluante – comme la déforestation d'un hectare de forêt, ou l'extension d'une ligne de fabrication « sale » – peut les inciter à repousser cette action dans le temps. Cette

---

<sup>36</sup> Dans les modèles d'optimisation, les opportunités sans regrets sont toujours saisies, donc les courbes passent par l'origine.

incitation sera accentuée si les acteurs pensent que lors des périodes suivantes ces pénalités se relâcheront. Mais dans les périodes suivantes, la rentabilité économique de l'action polluante qui a été repoussée dans le temps peut augmenter (la pression foncière s'accroît ou la demande de produits fabriqués par la ligne de production « sale » augmente). Pour inciter les mêmes acteurs à repousser encore leur action polluante (ou à y renoncer), la pénalité devra donc augmenter. L'effet de cette augmentation est alors de relever le coût de ces potentiels de réduction. Bien sûr la rentabilité économique de l'action repoussée en première période peut aussi diminuer (l'agriculture évolue et une alternative à la déforestation émerge, ou il est plus rentable d'équiper directement une nouvelle ligne de production « propre ») et l'effet sera inversé sur les coûts de réduction et la courbe de coût marginal sera abaissée.

#### *Capital de longue durée et permanence des abattements.*

Un autre effet est celui de l'inertie du capital. Les efforts de réduction peuvent être classés en deux catégories :

- *les projets de courte durée*, couvrant uniquement la période de décision (soit 5 ans dans notre modèle), soit de type « subventions vertes » – pour des acteurs ayant un certain consentement à recevoir pour changer leur comportement vers un comportement moins émetteur –, soit de type « investissement de court-terme » – parmi lesquels un certain nombre d'aménagements *end-of-pipe* pour neutraliser ou capter une partie des polluants.
- *les projets de longue durée*, couvrant tous les investissements dont les effets en terme de réduction des émissions et de financement s'étalent sur plusieurs périodes. Par exemple, les changements de technologie de production d'électricité constituent des projets dont l'horizon est supérieur à 20 ans.

La seconde catégorie de projets de réduction a des effets qui dépassent largement leur période de lancement. Par exemple si un gouvernement décide de relancer un programme nucléaire qui a été mis en veille<sup>37</sup>, les réductions dues à ce programme seront de fait réalisées pendant plusieurs périodes par rapport à un scénario BAU fondé sur un mix d'énergies fossiles. Il est vrai que les coûts seront eux aussi supportés pendant les périodes suivantes, et que finalement cela revient à dire que les potentiels de réduction existent encore aux périodes suivantes, au coût moyen annualisé des investissements de première période. La nuance importante est que ces réductions seront réalisées quoi qu'il arrive, quel que soit le régime d'engagement de réductions au cours de ces périodes suivantes. Pour traduire cela sur la courbe de coût marginal des périodes suivantes, il faudrait graduer l'axe des abscisses non plus à partir de zéro mais à partir du volume des abattements « obligatoires » dus aux capitaux de longue durée installés à la première période, sans oublier d'ajouter à la facture totale des réductions les coûts associés à ces réductions.

#### *Renouvellement ou éviction des opportunités ?*

Enfin, le problème du capital de long-terme mentionné ci-dessus fait émerger une question subsidiaire : si les opportunités de réduction sur du capital de long-terme (industrie, énergie, construction d'infrastructure de transports en commun, etc.) qui sont à bas coûts sont saisies à la première période, qu'en sera-t-il de ce type d'opportunités pour les périodes suivantes ? Il est certain que les coûts et les réductions associés aux opportunités de long-terme saisies persistent dans les périodes suivantes. Mais concernant les opportunités de long-terme à bas coût dans les périodes suivantes, il est légitime de se demander si de *nouvelles* possibilités de réduction de long-terme bon marché vont émerger ou si les réalisations de la première

---

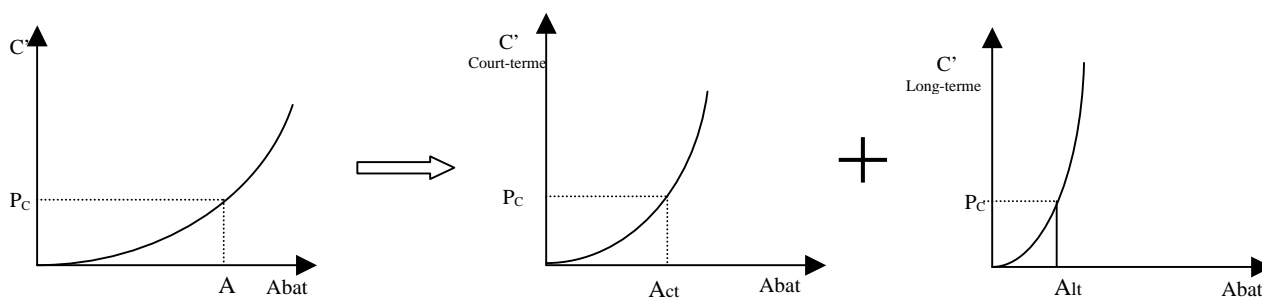
<sup>37</sup> comme c'est le cas dans certains pays d'Europe, comme l'Allemagne.

période ôtent toute possibilité de long-terme bon marché. La réponse nous semble assez tranchée, en faveur du renouvellement des opportunités. En effet, nous nous situons à la marge d'un scénario de croissance BAU pour juger de l'abattement effectué. Dans ce scénario de croissance, le capital de long-terme est renouvelé et augmenté selon une certaine dynamique et en fonction de certaines durées de vie. Les opportunités de réduction à *bas coût* sur ce capital correspondent à des choix plus « propres » au moment du renouvellement du capital ou des nouvelles installations contenues dans le scénario BAU, car les modifications sur le capital de long-terme « en cours de vie » raccourcissent sa durée de vie et sont en général plus coûteuses. Or à notre niveau d'agrégation, intégrant dans chaque courbe de coût marginal une quantité considérable de capitaux de long-terme renouvelés ou nouveaux, il est clair que chaque période de 5 ans apportera son flot de renouvellements et de nouvelles installations à effectuer, du fait de la croissance décrite par le scénario de référence. Par exemple sur la région Europe de l'Ouest, le scénario de référence suppose à chaque période un certain nombre de remplacements de centrales de production d'électricité en fin de vie, et apporte donc à chaque période de nouvelles opportunités de choix de technologies plus propres à bas coût.

### Propositions méthodologiques.

De ces différents effets dynamiques sur les courbes de coûts d'abattement, seuls les deux derniers points correspondent à une modification claire des courbes, car pour les autres points, des composantes antagonistes rendent le résultat incertain, et aucun résultat qualitatif général ne peut être proposé <sup>38</sup>. Nous proposons donc dans cette partie une prise en compte *primaire* de ces deux derniers effets, les paragraphes suivants détaillent l'esprit et la méthode de notre proposition.

Distinguons simplement deux classes de projets de réductions : des projets de *court-terme* ne s'étalant que sur une période et n'ayant aucune influence sur les périodes suivantes, des projets de *long-terme* s'étalant sur plusieurs périodes. Une courbe agrégée de coût marginal recouvre ces deux types d'actions de réductions, sans distinction possible entre les deux. Elle peut donc s'interpréter comme l'addition horizontale d'une courbe de court-terme et d'une courbe de long-terme, comme sur le graphique suivant :



A la période suivante, la courbe de coût marginal dépend des décisions prises à la période précédente, dans la mesure où les projets de long-terme et leurs coûts annualisés persistent durant la période suivante. *A priori*, cela réduit les nouveaux abattements à réaliser en imposant *de facto* les réductions et les coûts des projets de long-terme pour la seconde période.

<sup>38</sup> Pour aller plus loin dans cette étude, il faudrait disposer de recul sur plusieurs périodes de réduction, de données de coût aux différentes périodes, afin d'estimer l'amplitude des différents effets.



Quelle forme aurait alors la courbe de coût marginal d'abattement de la période suivante ? Revenons à nos deux courbes distinctes selon la durée des projets :

*Pour le court-terme*, la nouvelle courbe peut être considérée comme indépendante de la précédente et des choix faits en première période. Elle correspond à un jeu de nouvelles opportunités ou d'anciennes opportunités répétées, mais qui restent indépendantes des précédentes. Bien sûr cela reste une approximation vu les effets induits complexes que nous avons mentionné plus haut.

*Pour le long-terme*, la question principale est de savoir si du fait des projets lancés en première période, dont les effets (abattement et coûts) persistent dans les périodes suivantes, il n'existe plus en seconde période de projets de long-terme à bas coûts, ou si il en existe de nouveaux. Nous avons tranché en faveur de la seconde solution dans les paragraphes précédents.

En conséquence, les deux courbes sont conservées, et il est simplement nécessaire de reporter les coûts et les abattements induits sur le long-terme pour les périodes suivantes.

Pour simplifier notre analyse, nous supposons que tous les projets de long-terme s'étalent uniquement sur deux périodes : l'abattement qu'ils permettent se pérennise alors durant la seconde période, tout comme les coûts associés. Nous pouvons alors implémenter cette modification très simplement dans notre modèle, en effectuant les changements suivants :

- le programme de minimisation des coûts reste le même mais la contrainte change :

$$\begin{aligned} & \text{Min} \left( \int_{a(r,t)}^{a(r,t)} \text{MAC}(\alpha) d\alpha + p_C \cdot Qp(r,t) \right) \\ & \text{avec} \\ & \text{Eref}(r,t) \cdot (1 - a(t)) - \text{Abat}_{LT}(r,t-1) = Qa(r,t) + Qp(r,t) \end{aligned}$$

où  $\text{Abat}(r,t-1)$  est le volume de réductions qui se pérennisent sur deux périodes.

- Les coûts totaux d'abattement s'écrivent alors :

$$\text{Ctot}(r,t) = \int_0^{a(r,t)} \text{MAC}_r(\alpha) d\alpha + \int_0^{a_{LT}(r,t-1)} \text{MAC}_{LT,r}(\alpha) d\alpha$$

où  $\text{MAC}_{LT}$  est la courbe de coût de long-terme, et  $a_{LT}(r,t-1)$  le niveau d'abattement de long-terme réalisé à la période précédente (mesuré en pourcentage, soit

$$a_{LT}(r,t-1) = \frac{\text{Abat}_{LT}(r,t-1)}{\text{Eref}(r,t-1)}$$

- Et le calcul du niveau effectif d'abattement, en pourcentage des émissions du scénario de référence, est :

$$a_{\text{Eff}}(r,t) = a(r,t) + \frac{\text{Abat}_{LT}(r,t-1)}{\text{Eref}(r,t)}$$

Il nous reste cependant un problème à résoudre, concernant l'obtention d'une courbe explicite de coût marginal d'abattement de long-terme  $MAC_{LT,r}$ . Mais sans autre information que la courbe de coût agrégée elle-même, il existe une infinité de couples de courbes croissantes et concaves dont la somme horizontale permet de retrouver la courbe de coût agrégée. L'information manquante est en fait la « forme » des courbes spécialisées. Autrement dit, il faudrait connaître une fonction de part qui nous fournisse la part du court-terme ou du long-terme dans la quantité d'abattement possible à chaque niveau de prix.

Formellement, nous disposons d'une fonction agrégée  $MAC : a \mapsto MAC(a) = p$  et nous cherchons deux fonctions  $MAC_{ct}$  et  $MAC_{lt}$  du même type telles que :

$$MAC^{-1}(p) = MAC_{ct}^{-1}(p) + MAC_{lt}^{-1}(p)$$

Ce que nous avons appelé *fonction part* ci-dessus serait une fonction  $\varphi(p)$  définie par :

$$\forall p, MAC_{lt}^{-1}(p) = MAC^{-1}(p) \cdot \varphi(p)$$

et du même coup

$$\forall p, MAC_{ct}^{-1}(p) = MAC^{-1}(p) \cdot (1 - \varphi(p))$$

Cela nous permettrait, à partir d'expressions analytiques de  $MAC(p)$  et  $\varphi(p)$ , d'obtenir une expression pour les deux fonctions décrivant les coûts de court-terme et de long-terme (sous réserve qu'il existe des expressions analytiques pour les fonctions à inverser, ce qui est loin d'être évident dans le cas général).

Nous envisageons dans nos travaux le cas très simplificateur où  $\varphi(p)$  est constante, égale à  $\lambda$ . Si la courbe de coût agrégée est un polynôme du second degré <sup>39</sup>, nous pouvons calculer analytiquement les fonctions de coûts marginales spécialisées. Il convient alors de préciser ce que signifie le paramètre  $\lambda$ , dont la valeur peut être différente dans chaque région :  $\lambda$  peut être interprété comme une plus ou moins grande disponibilité des potentiels de long-terme par rapport au court-terme, ou bien comme une *préférence agrégée* ou *collective* sur le choix entre long-terme et court-terme.

---

<sup>39</sup> Ce qui est le cas des courbes présentées par l'équipe du MIT travaillant sur le modèle EPPA, utilisées dans nos travaux.