

# SIMULATION DE STRATEGIES DE NEGOCIATIONS POST-KYOTO DANS UN REGIME CLIMATIQUE INTERNATIONAL FRAGMENTE

## Rapport scientifique

Convention de recherche 0000328

GESTION ET IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE (GICC)



**Laurent Drouet**  
**Alain Haurie<sup>1</sup>**  
**Maryse Labriet**  
**Richard Loulou<sup>2</sup>**  
**Jean-Philippe Vial**  
**Marc Vielle**

30 novembre 2008

---

<sup>1</sup> Responsable scientifique

<sup>2</sup> Responsable administratif

**Résumé :** Ce projet soutenu par le programme du GICC a consisté à utiliser de manière harmonisée et couplée les modèles « bottom-up » TIAM et « top-down » GEMINI-E3 pour construire un ensemble de scénarios concernant les évolutions possibles des négociation climatiques post-2012. Une méthodologie issue de la théorie des jeux non-coopératifs, avec contraintes couplées sur les stratégies des joueurs est mise en œuvre pour caractériser des accords internationaux stables, une fois déterminé un partage équitable d'un budget global d'émissions de GES. Une autre approche, liée à la théorie des jeux dits de Stackelberg (avec un meneur et un ensemble de suiveurs), est utilisée pour étudier le pouvoir de l'OPEP, dans le contexte d'une politique climatique mondiale et la capacité de cette organisation à contrecarrer cette politique. Enfin différents « régimes fragmentés » impliquant des tempos différents dans la mise en œuvre de politiques de réduction des émissions, pour différents groupes de pays, sont analysés à partir de simulations réalisées à partir du modèle intégré TIAM, avec des objectifs de stabilisation à long terme du forçage radiatif à 3,5 W/m<sup>2</sup> ou à 3.75 W/m<sup>2</sup>. Les modèles mis en œuvre, les techniques de résolution des solutions des jeux non coopératifs, les scénarios analysés, correspondent à l'ensembles de « livrables » annoncés dans la définition du projet. Le didacticiel disponible à l'adresse <http://dokeos.ordecys.com>, login : gicc pwd : kanlo permet d'avoir accès à toute l'information concernant les modèles utilisés et les scénarios analysés.

**Abstract :** This research project supported by the GICC programme has consisted in the use of the bottom-up model TIAM and the top-down model GEMINI-E3, in a coordinated and coupled way to analyse an ensemble of scenarios concerning the post-2012 climate negotiations. Game theoretic methods using the concept of normalized equilibrium have been used to characterize stable international environmental agreements where a global emission budget is distributed among a set of coalitions of different groups of nations and the quotas in an international emissions trading scheme are the strategic decisions of these groups of nations. In another hierarchical game approach we have studied the capacity of OPEC to counteract a global climate policy. Finally different fragmented regimes, where different groups of nations are engaged at different levels of burden sharing and different timing of abatement constraints, have been analysed, using the integrated assessment model TIAM, where a long term limit on radiative forcing has been imposed at 3,5 W/m<sup>2</sup> ou à 3.75 W/m<sup>2</sup>. The models developed and tested and the scenarios analysed correspond to all the deliverables promised in the project proposal. A web based training course accessible at the address <http://dokeos.ordecys.com>, login : gicc pwd : kanlo allows the user to access all the information concerning the models and the scenarios developed and used in this research.

## Table des matières

<b>1. LE CHANGEMENT CLIMATIQUE: UN BREF ETAT DES CONNAISSANCES</b>	<b>5</b>
Introduction	5
L'évolution observée	5
Les émissions de GES	6
L'évolution probable	6
Trajectoires d'émissions durables	7
La sensibilité du climat	8
Références	8
<b>2. LE CONTEXTE DES NEGOCIATIONS POST-KYOTO</b>	<b>9</b>
Les politiques actuellement mises en œuvre	9
Pourquoi remédier à la fragmentation des politiques climatiques ?	10
Comment faire converger les politiques climatiques ?	11
Bibliographie	11
<b>3. LES MODELES TECHNICO-ECONOMIQUES UTILISES</b>	<b>13</b>
GEMINI-E3 (General Equilibrium Model of International-National Interactions between Economy Energy and the Environment)	13
TIAM (TIMES Integrated Assessment Model)	14
<b>4. LE COUPLAGE DES MODELES TIAM ET GEMINI-E3</b>	<b>17</b>
Coupler un modèle Bottom-Up avec un modèle Top-Down	17
<b>Une utilisation harmonisée des modèles TIAM et GEMINI-E3</b>	<b>18</b>
Etape 1 : Constitution d'un corps d'hypothèses communes	18
Etape 2 : Calcul de certains 'drivers' macro-économiques de TIAM sur la base des simulations de GEMINI-E3	18
Etape 3 : Calcul des prix des énergies de GEMINI-E3 sur la base des simulations de TIAM	18
<b>Une utilisation couplée des modèles TIAM et GEMINI-E3</b>	<b>19</b>
Harmoniser les nomenclatures des deux modèles	19
L'algorithme de couplage	19
L'intégration au sein des modèles TIAM et GEMINI-E3	20
Critère de convergence	20
Un exemple : un scénario de réduction du réchauffement climatique à 3.5W/m <sup>2</sup>	20
<b>Conclusion</b>	<b>22</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>23</b>
	3

<b>5. MODELISATION DU COMPORTEMENT DE L'OPEP FACE A UNE POLITIQUE CLIMATIQUE GLOBALE</b>	<b>25</b>
Objectifs	25
Méthodologie	25
Principaux résultats de l'étude	27
Quotas et profits OPEP optimaux	27
Prix du pétrole	27
Réaction des suiveurs	28
Impact sur le bien-être global	28
Conclusion	29
Bibliographie	29
<b>6. VERS UN PARTAGE D'UN BUDGET D'EMISSIONS DE GES</b>	<b>31</b>
Le modèle GEMINI-E3	31
Le Compte de référence	31
Le calcul de la contrainte climatique	32
Le Jeu simulé	33
Les dotations initiales	33
Les résultats	35
Profil d'émission mondiale et prix du CO <sub>2</sub>	35
Les affectations temporelles	36
Les surplus	36
Conclusion	37
Bibliographie	37
<b>7. EXEMPLE DE SIMULATION DE REGIMES FRAGMENTES (ASYMETRIQUES OU ASYNCHRONES)</b>	<b>39</b>
Résultats pour les 4 scénarios retenus	40
Coût total	40
Prix des GES	40
Énergie finale	41
La production d'électricité	41
Conclusion	43
<b>8. REFERENCES</b>	<b>45</b>

# 1. Le changement climatique: Un bref état des connaissances

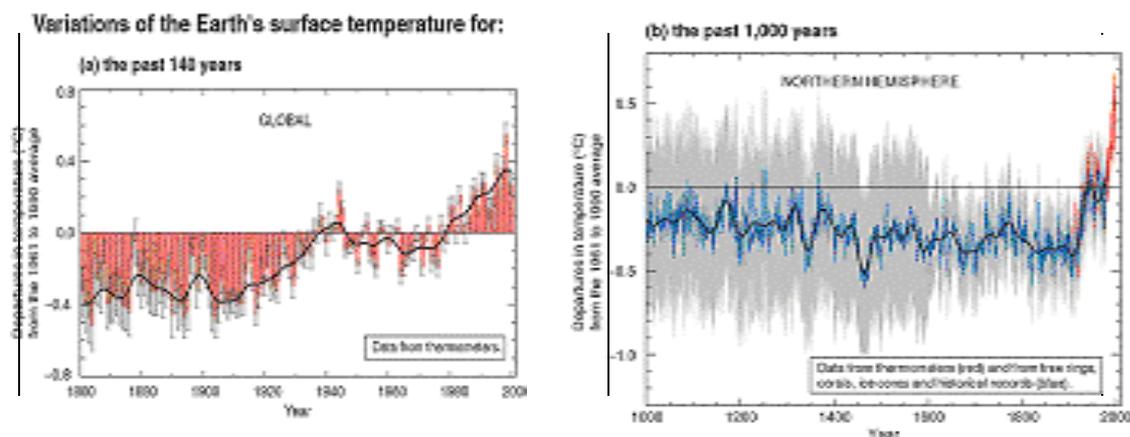
## Introduction

Dans ces quelques pages, au moyen de graphes commentés reproduits des publications du GIEC (IPCC) et du PNUD, nous résumons les points saillants de l'état des connaissances sur le changement climatique qui sont pertinents pour la recherche que nous avons menée. Les principaux faits à retenir sont :

- La température moyenne globale à la surface de la planète a augmenté d'environ 0,6°C (à +/- 0,2°C près) au cours du 20<sup>ème</sup> siècle, par rapport à la période préindustrielle et de 0,16°C supplémentaire de 2000 à 2005 ;
- l'origine anthropique du changement due à l'accumulation de gaz à effet de serre dans l'atmosphère ne fait plus de doute ;
- l'évolution probable de la température moyenne de surface d'ici la fin du 21<sup>ème</sup> siècle implique, selon les scénarios, une augmentation de température comprise entre 1,1 et 6,4 °C ;
- Une concentration de 450 ppmv CO<sub>2</sub>-e est un objectif permettant d'éviter une évolution du climat jugée dangereuse ;
- Une grande incertitude demeure encore sur la sensibilité réelle du climat au contenu carbone de l'atmosphère; une valeur voisine de 3°C est celle qui semble la plus vraisemblable.

## L'évolution observée

La manifestation d'un changement climatique est attestée par les estimations de l'évolution de la température de surface planétaire depuis plus de 1000 ans.



**Fig. 1.** Evolution de la température moyenne globale de surface planétaire (1860-2000) et dans l'hémisphère Nord : 1000-2000 (Source : IPCC, 2001).

- La température moyenne globale de la surface de la Terre est indiquée, année par année (barres rouges), et approximativement décennie par décennie (ligne noire, la courbe annuelle filtrée supprimant les fluctuations au-dessous des échelles de temps quasi décennales; Les barres noires correspondent à un intervalle de confiance de 95%). La température moyenne globale à la surface de la planète a augmenté d'environ 0,6°C (à +/- 0,2°C près) au cours du 20<sup>ème</sup> siècle, par rapport à la période préindustrielle (anomalie de température). Cette augmentation s'est produite essentiellement de 1910 à 1945 et de 1976 à 2000 (elle continue après cette date). L'anomalie thermique est rapportée à la moyenne des températures globales de surface, entre 1961 et 1990.
- Les variations, année par année (courbe gris foncé) et les variations moyennes sur 50 ans (courbe bleue), de la température globale annuelle moyenne de la surface, dans l'hémisphère Nord, au cours des 1000 dernières années (Crowley, 2000), ont été reconstruites à partir de données "indirectes", calibrées en fonction de celles obtenues au moyen du thermomètre. Durant les 1000 dernières années, on observe que le réchauffement, observé au 20<sup>ème</sup> siècle, a été sans précédent.

L'origine anthropique du changement de température est aussi clairement établie (probabilité >90%, IPCC, 2007).

## Les émissions de GES

Il est maintenant établi que les émissions de gaz à effet de serre (GES) anthropiques sont la cause d'un changement climatique probable. Le tableau suivant rappelle les principaux GES et leurs concentrations historiques et actuelles.

**Tableau 1.** Les gaz à effet de serre (Source : IPCC, 2007)

GES	1000 – 1750 *	2000	2005	Variation 1750-2005	Temps de résidence
CO <sub>2</sub>	280 ppm	368 ppm	379 ppm	+ 35 %	> 100 ans
CH <sub>4</sub>	700 ppb	1750 ppb	1774 ppb	+ 153 %	12 ans
N <sub>2</sub> O	270 ppb	316 ppb	319 ppb	+ 18%	114 ans
HFC, PFC, SF <sub>6</sub> Composés halogénés	Augmentation depuis 58 ans. Ralentissement visé suite au Protocole de Montréal.				Jusqu'à + de 30000 ans
O <sub>3</sub> troposphère	Augmentation entre 1750 et 2000			+ 35 %	
O <sub>3</sub> stratosphère	~5 ppb. Diminution (trou évolutif de la couche d'ozone)			3% +/- 2%	

\* Conditions quasi naturelles; temps de résidence atmosphérique.

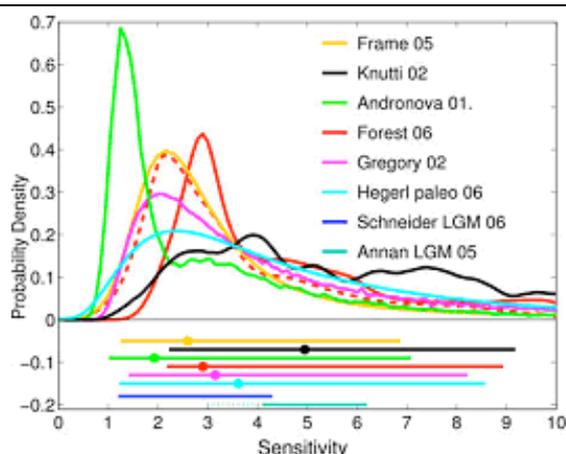
## L'évolution probable

Le GIEC estime, suivant les scénarios d'émissions, une augmentation de température moyenne globale de surface de plusieurs degrés Celsius d'ici à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle (voir tableau 3). En particulier, il est estimé qu'une concentration d'équilibre de CO<sub>2</sub>-e de 550 ppm résultera probablement (probabilité >90%) en une augmentation de température de plus de 1.5°C, une augmentation de 2.9°C étant toutefois considérée comme le « *best estimate* » (tableau 2). L'atteinte d'une concentration de stabilisation moindre, par exemple moins de 445 ppm CO<sub>2</sub>-e) permet de limiter la température, mais requiert alors des réductions de CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub> seulement) d'au moins 50% dès 2050, en comparaison des émissions de 2000 (tableau 3).

**Table TS.5.** Best estimate, likely ranges and very likely lower bounds of global mean equilibrium surface temperature increase (°C) over pre-industrial temperatures for different levels of CO<sub>2</sub>-equivalent radiative forcing, as derived from the climate sensitivity.

Equilibrium CO <sub>2</sub> -eq (ppm)	Temperature Increase (°C)		
	Best Estimate	Very Likely Above	Likely in the Range
350	1.0	0.5	0.6–1.4
450	2.1	1.0	1.4–3.1
550	2.9	1.5	1.9–4.4
650	3.6	1.8	2.4–5.5
750	4.3	2.1	2.8–6.4
1000	5.5	2.8	3.7–8.3
1200	6.3	3.1	4.2–9.4

**Tableau 2 :** Augmentation de température selon les concentrations d'équilibre



**Fig. 2.** Sensibilité du CO<sub>2</sub> à la température et densité de probabilité, selon 8 modèles (IPCC 2007).

Table TS.2: Classification of recent (Post-Third Assessment Report) stabilization scenarios according to different stabilization targets and alternative stabilization metrics [Table 3.5].

Category	Additional radiative forcing (W/m <sup>2</sup> )	CO <sub>2</sub> concentration (ppm)	CO <sub>2</sub> -eq concentration (ppm)	Global mean temperature increase above pre-industrial at equilibrium, using "best estimate" climate sensitivity <sup>a)</sup> , <sup>b)</sup> (°C)	Peaking year for CO <sub>2</sub> emissions <sup>c)</sup>	Change in global CO <sub>2</sub> emissions in 2050 (% of 2000 emissions <sup>c)</sup>	No. of assessed scenarios
I	2.5-3.0	350-400	445-490	2.0-2.4	2000 - 2015	-85 to -50	6
II	3.0-3.5	400-440	490-535	2.4-2.8	2000 - 2020	-60 to -30	18
III	3.5-4.0	440-485	535-590	2.8-3.2	2010 - 2030	-30 to +5	21
IV	4.0-5.0	485-570	590-710	3.2-4.0	2020 - 2060	+10 to +60	118
V	5.0-6.0	570-660	710-855	4.0-4.9	2050 - 2080	+25 to +85	9
VI	6.0-7.5	660-790	855-1130	4.9-6.1	2060 - 2090	+90 to +140	5
Total							177

Notes:

- a) Note that global mean temperature at equilibrium is different from expected global mean temperatures in 2100 due to the inertia of the climate system.
  - b) The simple relationships  $T_{eq} = T_{pre-CO2} \times \ln([CO_2]/278)/\ln(2)$  and  $\Delta Q = 5.35 \times \ln([CO_2]/278)$  are used. Non-linearities in the feedbacks (including e.g., ice cover and carbon cycle) may cause time dependence of the effective climate sensitivity, as well as leading to larger uncertainties for greater warming levels. The best-estimate climate sensitivity (3 °C) refers to the most likely value, that is, the mode of the climate sensitivity PDF consistent with the WGI assessment of climate sensitivity and drawn from additional consideration of Box 10.2, Figure 2, in the WGI AR4.
  - c) Ranges correspond to the 15<sup>th</sup> to 85<sup>th</sup> percentile of the Post-Third Assessment Report (TAR) scenario distribution. CO<sub>2</sub> emissions are shown, so multi-gas scenarios can be compared with CO<sub>2</sub>-only scenarios.
- Note that the classification needs to be used with care. Each category includes a range of studies going from the upper to the lower boundary. The classification of studies was done on the basis of the reported targets (thus including modelling uncertainties). In addition, the relationship that was used to relate different stabilization metrics is also subject to uncertainty (see Figure 3.16).

Tableau 3 : Scénarios « Post-TAR » du GIEC

### Trajectoires d'émissions durables

Dans un scénario utilisé pour le rapport du PNUD « UNDP Human Development Report 2007 », il est estimé qu'une réduction de moitié des émissions d'ici 2050 pourrait nous épargner un changement climatique dangereux, c'est-à-dire qui impliquerait une augmentation de la température moyenne de surface de plus de 2°C.

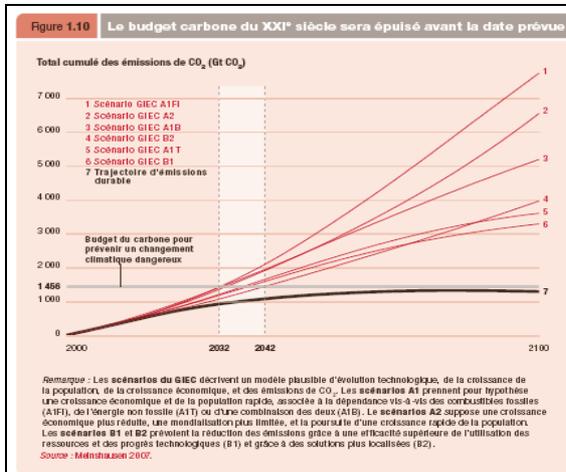


Fig. 3a. Emissions cumulées de CO<sub>2</sub> et limite 'dangereuse'. (Source: PNUD, 2007). Le budget du carbone anthropique (limite) pour prévenir un changement climatique dangereux serait de 1456\*10<sup>12</sup>t de CO<sub>2</sub>. Les 6 scénarios du GIEC dépasseront cette valeur entre 2032 et 2042 (espace blanc).

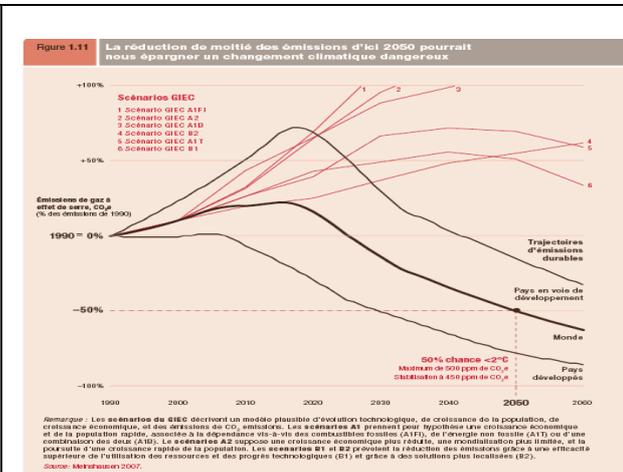


Fig.3b. Trajectoires d'émissions durables d'ici à 2050, CO<sub>2</sub>-e (Source : PNUD, 2007)

Selon ce scénario le budget total d'émissions de CO<sub>2</sub> liées à l'utilisation de l'énergie pour le 21<sup>ème</sup> siècle serait d'environ 1456 GtCO<sub>2</sub>. Ce budget d'émissions serait compatible avec un objectif de concentration de GES de 462 ppmv CO<sub>2</sub>-e.

## La sensibilité du climat

Il demeure une grande incertitude sur la sensibilité du climat, exprimée par la variation de température moyenne de surface résultant d'un doublement de la concentration de GES par rapport à l'ère pré-industrielle (Figure 2). La valeur la plus probable (probabilité >90% selon le dernier rapport du GIEC) de cette sensibilité se situe entre 2 et 4,5 °C selon les modèles climatiques utilisés. La valeur 3°C est considérée comme celle permettant le « *best agreement* » entre les observations et les modèles, selon le dernier rapport du GIEC (IPCC, 2007, WG1, chapter 10). Cependant des articles récents mettent en doute notre capacité à estimer correctement ce paramètre, du fait du comportement chaotique et instable du système climatique.

## Références

1. den Elzen, M., M. Meinshausen and D. van Vuuren (2007). "Multi-gas emission envelopes to meet greenhouse gas concentration targets: Costs versus certainty of limiting temperature increase." *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions* 17(2): 260-280.
2. IPCC. 2001. WG1 Climate Change 2001: Third Assessment Report. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and NY.
3. IPCC. 2004. Workshop Report on Climate Sensitivity. UNEP, WMO, Paris.
4. IPCC. 2007. Climate Change 2007: Fourth Assessment Report (AR4). Cambridge University Press, Cambridge, UK, and NY.
5. PNUD. 2007. Rapport mondial sur le développement humain 2007/2008. Ed. La Découverte, Paris.
6. Knutti, R., M. R. Allen, P. Friedlingstein, J. M. Gregory, G. C. Hegerl, G. A. Meehl, M. Meinshausen, J. M. Murphy, G.-K. Plattner, S. C. B. Raper, T. F. Stocker, P. A. Stott, H. Teng and T. M. L. Wigley (2008). "A review of uncertainties in global temperature projections over the twenty-first century." *Journal of Climate* 21: 2651-2663.

## 2. Le contexte des négociations post-Kyoto

Le protocole de Kyoto a marqué un tournant majeur dans la lutte contre le changement climatique. Accord international de premier plan dans le domaine de l'environnement, il marquera peut être une nouvelle ère de développement économique adossée à une coopération étroite entre les pays renouvelant le capitalisme du 21<sup>ème</sup> siècle. En effet, si des accords de coopération internationale avaient déjà eu lieu dans le domaine de l'environnement, nous pensons par exemple au protocole de Montréal sur les substances appauvrissant la couche d'ozone, leur domaine d'application et leur implications économiques sont sans commune mesure avec le protocole de Kyoto. Touchant la production et la consommation d'énergie, au cœur de la croissance économique, ce protocole et tout autre accord qui suivra nécessitent sur le long terme une refonte complète de nos modes de production et de consommation issus de la révolution industrielle. Pour autant, si son caractère novateur, voire révolutionnaire, est indéniable, il n'est pas exempt de limites ou de faiblesses et les soubresauts de sa mise en œuvre ont montré que beaucoup restait à faire pour sa consolidation et son extension. À cet égard, les négociations climatiques en cours sur « l'après-Kyoto » vise l'atteinte d'un nouvel accord post-2012, qui pourrait être proposé dès la Conférence des Parties de Copenhague, en 2009. C'est donc l'objet de cette recherche de poser des jalons pour cette redéfinition en utilisant les derniers développements de la recherche économique et d'appliquer ces outils en vue de fournir des éléments de réflexion sur la consolidation de la négociation en matière de lutte contre le changement climatique.

Depuis la signature du protocole de Kyoto en 1997 puis son entrée en vigueur en 2008, de nombreux faits ont vu le jour. Certains positifs, comme la mise en place de la directive européenne des quotas d'émission de CO<sub>2</sub>, semblent indiquer que les pays européens se sont clairement inscrits dans une démarche de modification de leurs modes de vie et dans une dynamique de développement durable. D'autres éléments, comme le niveau actuel des émissions de gaz à effet de serre (GES) au regard des cibles définies par le protocole (les derniers inventaires montrent que beaucoup de pays dépassent largement la cible imposée), sont moins positifs et montrent que les efforts doivent être poursuivis, voire relancés. Enfin, la décision des Etats-Unis de ne pas ratifier le protocole de Kyoto a montré la fragilité de ce type d'accord international. Sans gouvernement supranational pour imposer la mise en œuvre de tels accords, le succès de ces accords dépend entièrement de l'intérêt spécifique de chaque pays. Cette fragilité contribue à la résistance des pays en développement tels que la Chine, l'Inde et le Brésil à accepter des cibles de réduction, malgré le fait certain qu'ils seront les acteurs majeurs de l'économie de notre siècle mais aussi des émetteurs importants de GES et les régions les plus exposées aux impacts du changement climatique.

Plusieurs propositions ou déclarations de volonté d'action à long terme, par exemple par le G8+5 (incluant le Brésil, la Chine, l'Inde, le Mexique et l'Afrique du Sud), ou par le nouveau Président des Etats-Unis, bien que non engageantes, semblent aller dans une direction de l'action à long terme.

### ***Les politiques actuellement mises en œuvre***

L'après 2012 devra, autant que possible, intégrer les politiques et les instruments actuellement mis en place et qui découlent principalement des objectifs assignés à Kyoto. L'examen de ces politiques montre que les réponses au protocole de Kyoto ont été multiples et empreintes d'un réel pragmatisme. C'est certainement une de ses forces, mais aussi une difficulté car la fragmentation qui en découle pose problème pour la définition d'une politique internationale susceptible de faire converger ou de rendre cohérentes toutes ces initiatives. Il peut être utile de détailler brièvement les initiatives à partir desquelles il nous faudra dessiner le devenir du protocole de Kyoto :

- **La directive européenne des quotas d'émission.** Cette directive est très certainement emblématique du volontarisme européen en matière de lutte contre le changement climatique. Nouveau mécanisme mis en œuvre dans le cadre du protocole de Kyoto, il est à l'heure actuelle le premier marché de CO<sub>2</sub> supranational, préfigurant ce que pourrait devenir le futur de la négociation climatique. Au sein de ce marché, les secteurs dits éligibles échangent des permis d'émission négociables sur la base d'une allocation définie par la Commission Européenne sur proposition des états membres. Bien que la genèse de ce marché soit récente et que la première phase ait nécessité des ajustements importants pour garantir l'efficacité du système, son fonctionnement reste clairement une réussite qui prouve que ce type d'instrument (les marchés de permis d'émission négociables) peut bien fonctionner à un niveau international.
- **Le mécanisme de développement propre**, autre instrument lui aussi issu du protocole de Kyoto, permet d'insérer au sein des pays en développement une dynamique de développement durable tout en fournissant aux pays industrialisés des opportunités moins coûteuses de réduction des émissions. Ce mécanisme préfigure, pour certains, l'avènement d'un marché mondial de GES; l'application conjointe, au sein du protocole de Kyoto, permet une approche similaire avec les pays en transition.
- **Les politiques nationales**, passées sous silence dans un premier temps au profit de l'analyse de politiques internationales de lutte contre l'effet de serre (MDP, permis d'émission, coopération technologique...), occupent de plus en plus de place car elles s'avèrent incontournables, en partie à cause de la difficulté de mettre en œuvre à un niveau international des politiques coordonnées, mais aussi et surtout parce qu'une politique de lutte contre le changement climatique ne peut de façon réaliste se résumer à la mise en place d'une taxe sur le CO<sub>2</sub>. En France, le Grenelle de l'environnement montre par exemple que l'Etat a son rôle à jouer dans le développement d'infrastructures de transport, dans l'adoption de normes environnementales (dans le bâtiment par exemple) et que ces mesures sont bien complémentaires à la mise en place à terme d'un prix du CO<sub>2</sub> pour toutes les activités économiques.

## **Pourquoi remédier à la fragmentation des politiques climatiques ?**

La situation actuelle est caractérisée par ce qui est communément appelé une *fragmentation des politiques climatiques* issue tout d'abord de différents niveaux d'implication des pays dans la lutte contre les changements climatiques, et d'instruments variés utilisés pour réduire les émissions de GES.

On peut d'abord s'interroger sur les raisons qui peuvent motiver à vouloir réduire cette fragmentation qui découle d'un certain pragmatisme, de sensibilités différentes des pays dans l'utilisation des instruments économiques et de l'histoire récente du développement économique où certains pays apparaissent plus responsables que d'autres pour les émissions passées.

Ces raisons sont de plusieurs ordres :

- *Scientifique d'abord* : le chapitre 1 de ce rapport rappelle que les réductions d'émission nécessaires pour limiter le réchauffement de notre planète requièrent la participation de tous ;
- *Climatique* : la dynamique des émissions et des changements climatiques résultants nous pousse à intégrer rapidement les pays en développement qui ne se sont pas encore engagés dans des objectifs de réduction des émissions de GES. Ainsi, les premières simulations de régime fragmenté réalisées avec le modèle TIAM et rapportées dans ce chapitre, montrent que tout retard, même de 10 ans, dans l'intégration de ces pays peut conduire à ne pas pouvoir atteindre les cibles de limitation de réchauffement proposées par les climatologues ;
- *Economique* : le foisonnement des politiques économiques actuellement mises en place peut conduire à freiner l'adoption de politiques plus ambitieuses. D'abord, parce qu'elles peuvent rendre difficile la vérification des efforts effectivement mis en œuvre ; ensuite, parce qu'elles peuvent être perçues comme des moyens de fausser la concurrence internationale ; enfin

parce que le *monitoring* de tous ces instruments apparaît difficile. C'est pourquoi les économistes ont toujours milité pour l'adoption d'un prix unique du CO<sub>2</sub> s'imposant à tous les secteurs, à toutes les activités (production, consommation), à tous les pays et à tous les gaz (bien sûr, le choix de la taxe doit être approprié pour garantir, autant que possible, des réductions suffisantes des émissions permettant de ne pas dépasser le niveau d'émissions considérées dangereux). De plus l'adoption d'un objectif de type « facteur 4 » peut conduire à des prix du CO<sub>2</sub> très élevés et il y a bien un intérêt à mutualiser de la manière la plus efficace possible tous ces efforts.

## **Comment faire converger les politiques climatiques ?**

Les recherches menées dans cette étude apportent plusieurs éléments de réponse.

- D'abord, il apparaît clairement que l'intégration des pays en développement doit être une priorité. En effet, des pays tels que la Chine, le Brésil et l'Inde seront les futurs gros émetteurs de GES et leur intégration est donc primordiale. Les simulations de régimes fragmentés réalisées dans ce chapitre avec le modèle TIAM montrent tout l'intérêt de les intégrer dès 2020 dans un marché international de permis d'émissions négociables. La participation de ces pays est aussi un préalable à la participation d'autres pays dont le développement est moins avancé ou dont la contribution en matière d'émission de GES est moins importante.
- Un autre groupe de pays dont le comportement peut affecter la négociation sont les pays producteurs d'énergie et en particulier l'OPEP. L'étude présentée dans le chapitre 6 montre que les stratégies de production de l'OPEP ont un impact significatif sur les prix du pétrole, eux-mêmes ayant un effet sur les décisions technologiques, qu'il y ait accord mondial sur les changements climatiques ou pas. Bien que le pouvoir de l'OPEP sur les émissions et sur les politiques climatiques apparaisse limité, il n'est pas nul, et l'habituelle résistance de l'OPEP dans les négociations climatiques le prouve. La négociation future devra réserver à ces pays une place particulière.
- Le succès d'un accord international devra aussi reposer sur une architecture acceptable par tous et suffisamment flexible pour garantir « l'auto-exécution » de l'accord. L'utilisation de la théorie des jeux, adaptée au contexte de ces négociations est développée dans le chapitre 6 apporte des éléments intéressants pour les négociations à venir. Ainsi, si l'on suppose qu'il y a un accord scientifique sur le seuil de réchauffement à ne dépasser, nous montrons qu'il est possible d'obtenir une solution acceptable par tous issue de la mise en place d'un marché de permis négociables où les dotations initiales auront fait l'objet d'un accord international préalable.
- Enfin, les résultats de nos simulations montrent que certaines technologies apparaissent déterminantes et que la mise en place d'un accord international devra favoriser leur développement. La coopération technologique peut de ce point de vue faciliter l'adoption d'un accord international par les pays en développement. Le MDP (mécanisme de développement propre) existant est un exemple de ces transferts technologiques.

## **Bibliographie**

1. Jay Michael, 2008. Combating Climate Change: An International Cooperation Framework Beyond 2012. A consensus paper by legislators from the G8 and +5 countries. For Globe International (Global Legislators Organisation for a Balanced Environment), Tokyo, June 2008. [http://www.globeinternational.org/docs/content/globe\\_post2012\\_paper\\_tokyo\\_final.doc](http://www.globeinternational.org/docs/content/globe_post2012_paper_tokyo_final.doc)
2. Harrison K. and L. McIntosh Sundstrom, 2007. The Comparative Politics of Climate Change. *Global Environmental Politics* 7:4, pp.1-18.



### 3. Les modèles technico-économiques utilisés

#### ***GEMINI-E3 (General Equilibrium Model of International-National Interactions between Economy Energy and the Environment)***

Nous utilisons dans ce projet la cinquième version du modèle GEMINI-E3 (<http://www.gemini-e3.net>). Le modèle GEMINI-E3 est un modèle d'équilibre général calculable de l'économie mondiale, dynamique et récursif à plusieurs secteurs et plusieurs pays/régions. GEMINI-E3 a dès le début été spécifiquement conçu pour produire les éléments d'appréciation macro-économique pertinents dans l'évaluation des politiques énergétiques et environnementales telles que celles liées au changement climatique. Le modèle GEMINI-E3, dont la création remonte à 1992 a depuis fait l'objet de plus d'une trentaine d'utilisations. Un progrès essentiel dans le développement de GEMINI-E3 a résulté de la définition d'un protocole précis d'utilisation, avec des règles assurant un calcul rigoureux des coûts macro-économiques. De fait, une caractéristique du modèle est que sa construction s'est constamment appuyée sur des fondements théoriques, portant notamment sur la fiscalité optimale (et l'approche de l'optimum de second rang) et la théorie du commerce international. Les problèmes de double dividende, et en particulier les interactions entre fiscalité et commerce extérieur, ont fait l'objet d'une analyse théorique approfondie. Cette démarche a permis de consolider les fondements conceptuels du modèle numérique et de donner une grande transparence à la présentation des résultats.

Le modèle GEMINI-E3 possède les caractéristiques suivantes :

- **Description de l'ensemble de l'économie**, GEMINI-E3 décrit l'ensemble des secteurs de l'économie mondiale à travers 28 régions, et utilise une nomenclature en 18 secteurs/produits, présentée dans l'encadré 1;
- **Pour chacun des secteurs** GEMINI-E3 décrit un équilibre ressources-emploi détaillant d'un côté la production et les importations, de l'autre les utilisations finales du bien (consommation des ménages, exportation, investissement) de même que les consommations intermédiaires ;
- **Description de tous les inputs liés à la production**, pour chaque secteur il représente les facteurs utilisés pour réaliser la production (travail, capital, énergie, autres consommations intermédiaires) via une structure de fonction CES emboîtées ;
- **La demande des ménages** est dérivée du modèle de dépense linéaire ou de Stone-Geary, découlant d'une fonction d'utilité, ce qui permet d'exprimer de manière rigoureuse le gain ou la perte économique sous forme de surplus des consommateurs<sup>3</sup>. La demande de travail ainsi que le comportement d'épargne sont en revanche supposés inélastiques ;
- **L'ensemble des échanges internationaux de biens et services** sont décrit, GEMINI-E3 suppose que les balances commerciales sont équilibrées via une modification des taux de change ;
- **Les émissions de gaz à effet de serre**, GEMINI-E3 calcule les émissions de CO<sub>2</sub> liées à la combustion d'énergie fossile et les émissions des autres gaz à effet de serre compris dans le « panier kyoto » (CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, gaz fluorés): au total 110 sources d'émission de gaz à effet de serre sont décrites par pays. La réduction des émissions de gaz à effet de serre peut être obtenue à l'aide de différents instruments : taxe, quotas, permis négociables, et plus généralement les instruments de flexibilité prévus par le Protocole de Kyoto ;
- **Une modularité du modèle** concernant l'agrégation géographique des zones permettant selon les sujets traités d'agréger les régions du modèle pour bénéficier d'une nomenclature plus compacte et de temps de calcul réduit ;

<sup>3</sup> A savoir la différence entre la variation effective de revenu et la variation compensatrice de revenu (celle qui laisserait inchangée l'utilité après la modification du système de prix pour les consommateurs), ce qui est bien la notion introduite par Dupuit.

- **La banque de données du modèle** est basée sur les données du GTAP, complétées par les statistiques de l'Agence Internationale de l'Energie, de l'OCDE, du FMI et l'EPA.

#### Encadré 1: Nomenclatures du modèle GEMINI-E3 (Version 5)

Secteurs	Régions
Charbon	France
Pétrole brut	Allemagne
Gaz naturel	Royaume Uni
Produits pétroliers raffinés	Italie
Electricité	Espagne
Agriculture	Pays-Bas
Sylviculture	Belgique
Produits minéraux	Pologne
Chimie	Reste de l'Union Européenne (configuration à 25 pays)
Sidérurgie	Suisse
Papier et carton	Autres pays européens
Transport terrestre	Etats-Unis
Transport maritime	Canada
Transport aérien	Australie et Nouvelle Zélande
Biens de consommation	Japon
Biens d'équipement	Russie
Service	Reste de l'ex Union Soviétique
Logement	Chine
	Brésil
	Inde
	Mexique
	Venezuela
	Reste de l'Amérique Latine
	Turquie
	Reste de l'Asie
	Moyen Orient
	Tunisie
	Reste de l'Afrique

### TIAM (TIMES Integrated Assessment Model)

Le modèle **TIAM** (TIMES Integrated Assessment Model) est la plus récente incarnation de la famille des modèles technico-économiques TIMES, dont des exemples plus anciens sont MARKAL et EFOM. Il permet la modélisation à long terme (2100) de scénarios technico-économiques représentatifs du système énergétique. Il a été développé sous le parrainage de l'ETSAP (Energy Technology Systems Analysis Programme [www.etsap.org](http://www.etsap.org)), sous l'égide de l'Agence internationale de l'énergie. Le modèle TIAM possède les caractéristiques suivantes :

- **Intégration de l'ensemble du système énergétique** : ressources primaires, conversion, transport, distribution, et usages finals des formes énergétiques sont représentés dans TIAM (Figure 1). Chaque étape est décrite au moyen de nombreuses technologies existantes et futures, oeuvrant soit en concurrence soit en complémentarité pour la satisfaction des demandes économiques dans tous les secteurs d'utilisation ;
- **Description détaillée des technologies** (plus de 1000 dans chaque région, existantes et futures) au moyen de nombreux paramètres techniques (efficacité, facteur de disponibilité, dates de disponibilité, délais de construction, etc.) et économiques (coûts de construction, de démantèlement, de fonctionnement, de livraison, taux d'actualisation, etc.) ;
- **Description détaillée de toutes les formes énergétiques** (plus de 100 dans la plupart des instances) primaires, secondaires, et dérivées. Certaines formes énergétiques, dont l'électricité et la chaleur de basse température, sont identifiées par saison et par période de la journée (jour-nuit) pour une meilleure représentation ;

- **Équilibre partiel** : TIAM calcule un équilibre dynamique inter-temporel sur les marchés énergétiques, sur un horizon de long terme (jusqu'en 2100) divisé en périodes de longueur variable choisies par l'utilisateur. Le modèle met en concurrence l'ensemble des technologies d'usage pour satisfaire les demandes de services énergétiques. L'équilibre est calculé au moyen de la programmation mathématique en maximisant le surplus total (producteurs plus consommateurs) qui sert de mesure du bien-être.
- **Représentation du monde en 15 régions** liées par des variables d'échange des diverses formes d'énergie (pétrole et produits dérivés, gaz naturel et gaz liquéfié, liquides du gaz naturel, charbon) et des droits d'émissions;
- **Demandes en services énergétiques** : TIAM est « tiré » par un vecteur de 60 demandes en services énergétiques dans tous les secteurs de consommation finale d'énergie. La trajectoire de chaque demande est choisie par l'utilisateur dans le scénario de référence, établi à partir d'indicateurs démographiques et macroéconomiques (population, PIB, progrès technique, par l'intermédiaire d'une élasticité représentative du degré de (dé)couplage, l'indicateur socio-économique et la demande. Dans les scénarios autres que celui de référence, le modèle ajuste chaque demande future en fonction de son prix implicite, lui-même calculé de manière endogène.
- **Représentation fine des flux monétaires** résultant des décisions d'investissement, de mise hors service, et de fonctionnement des diverses composantes du système énergétique. De plus, TIAM tient compte de la valeur résiduelle du capital en fin d'horizon, ce qui permet d'éviter les distorsions de fin d'horizon ;
- **Représentation des émissions de gaz à effet de serre** (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> et N<sub>2</sub>O) au plan global, régional, par secteur, par technologie; les émissions provenant de l'agriculture et de l'utilisation des sols sont aussi représentées. La contribution au changement climatique des autres gaz à effet de serre (non explicitement modélisés) est comptabilisée directement par leur forçage radiatif.
- **Module climatique** : TIAM inclut un module climatique qui, partant des émissions de gaz à effet de serre représentés dans le modèle, calcule leurs concentrations atmosphériques en reproduisant leurs cycles de vie. Puis, le module calcule le forçage radiatif total résultant de ces gaz et des autres effets de forçage non explicitement modélisés dans TIAM (via un forçage exogène). Enfin, le module calcule le changement des températures moyennes de l'atmosphère et de l'océan. Le module climatique permet de faire tourner TIAM en lui imposant des cibles précises sur n'importe laquelle de ces variables climatiques.

La description de TIAM et des principes de modélisation est disponible sur le site : [www.etsap.org](http://www.etsap.org) .

### Références récentes

1. Bernard, A. & Vielle, M. *GEMINI-E3, a General Equilibrium Model of International National Interactions between Economy, Energy and the Environment*, Computational Management Science, 2008, 5, 173-206.
2. Loulou, R., M. Labriet, A. Haurie and A. Kanudia. 2008. *OPEC Oil Pricing Strategies in a Climate Regime, a Two-Level Optimization Approach in an Integrated Assessment Model*. Submitted to Environmental Modeling and Assessment.
3. Labriet, M. and R. Loulou. 2008. *How Crucial is Cooperation in Mitigating World Climate? Analysis with World-MARKAL*. Computational Management Science, Special issue "Managing Energy and the Environment", Vol. 5, Issue 1, pp. 67-94.
4. Loulou, R. and M. Labriet. 2008. *ETSAP-TIAM: the TIMES integrated assessment model Part I: Model structure*. Computational Management Science, Vol. 5, Issue 1, pp.7-40.
5. Loulou R. 2008. *ETSAP-TIAM: the TIMES integrated assessment model Part II: Mathematical formulation*. Computational Management Science, Vol. 5 (1-2), 41-66.
6. Labriet, M., R. Loulou and A. Kanudia. 2008. *Is a 2 degrees Celsius warming achievable under high uncertainty? Analysis with the TIMES integrated assessment model*. Cahier du GERAD, G-2008-30, 29 p.

7. Vaillancourt, K., Labriet M., Loulou R. and JP Wauub, 2008. *The role of nuclear energy in long-term climate scenarios: An analysis with the World-TIMES model*. Energy Policy, Vol.36, Issue 7, pp.2296-2307.
8. Labriet M., R. Loulou and A. Kanudia, 2005. *Global energy and CO2 emission scenarios: analysis with a 15-region world MARKAL model*. In: The Coupling of Climate and Economic Dynamics, A. Haurie and L. Viguier (Guest Editors), Advances to Global Change Research, Vol. 22, Springer, Dordrecht (Netherlands), p.205-235.
9. Drouet L., Haurie A., Labriet M., Thalmann P., Vielle M. and L. Viguier, 2005. *A Coupled Bottom-Up / Top-Down Model for GHG Abatement Scenarios in the Housing Sector of Switzerland*. In: *Energy and Environment*, ed. by R. Loulou, J.-P. Wauub, and G. Zaccour, Springer, New York (United States), p.27-61.
10. Kanudia A., Labriet M., Loulou R., Vaillancourt K. and JP Wauub, 2005. *The World-MARKAL model and its application to cost-effectiveness, permit sharing, and cost-benefit analyses*. In: *Energy and Environment*, ed. by R. Loulou, J.-P. Wauub, and G. Zaccour, Springer, New York (United States), p.111-148.

## 4. Le couplage des modèles TIAM et GEMINI-E3

Ce chapitre présente les travaux réalisés dans le cadre de ce projet et visant à coupler les modèles TIAM et GEMINI-E3. Un texte plus détaillé sur ce sujet figure en annexe.

### ***Coupler un modèle Bottom-Up avec un modèle Top-Down***

Les raisons qui poussent à coupler un modèle d'équilibre partiel à un modèle macro-économique sont principalement issues d'une volonté d'enrichir les deux modèles en palliant les faiblesses de l'un par les points forts de l'autre (cf. C. Böhringer (1998)). Si les modèles *bottom-up* comportent souvent une représentation très riche du secteur qu'ils étudient (en l'occurrence ici le secteur énergétique) ils n'appréhendent souvent pas l'ensemble des interactions des marchés, notamment celles qui transitent en dehors du secteur de l'énergie et qui sont issues du bouclage macro-économique. Par exemple, une politique de taxation de l'énergie peut conduire à des baisses d'activité relativement importantes dans des secteurs intensifs en énergie dans certaines régions et les augmenter dans d'autres régions. Cette relocalisation de la production industrielle n'est pas directement capturée par un modèle bottom-up traditionnel. Autre exemple, la redistribution des recettes issues d'une fiscalité carbone peut modifier l'ensemble de l'équilibre économique et interagir en retour sur le secteur de l'énergie. Enfin, la modification du commerce international peut elle aussi affecter les conditions de la consommation et de la production d'énergie, conditions qui sont souvent supposées inchangées dans les modèles d'équilibre partiel. Les modèles macro-économiques ne sont pas, eux non plus, exempts de faiblesses. L'utilisation de CES (*Constant Elasticity of Substitution*) emboîtées pour décrire l'activité de consommation d'énergie limite ou ne permet pas de prendre en compte des ruptures technologiques dans l'utilisation de l'énergie qui sont susceptibles d'apparaître dans le cadre de politiques climatiques de grande ampleur. La représentation de la production d'énergie fossile est aussi souvent peu détaillée et les prix qui en découlent nécessitent d'être évalués par des études énergétiques réalisées par ailleurs. C'est pourquoi de nombreux modèles macro-économiques fonctionnent à prix des énergies fossiles définis de manière exogène. Il y a donc un intérêt à coupler ces deux types de modèle afin de les consolider mutuellement.

Une première tâche de cette étude a consisté à faire une revue des expériences déjà menées à bien. Cette revue est présentée dans le document fourni en annexe. Nous avons mis en avant cinq options de couplage possibles :

- Une première option consiste à faire communiquer les deux modèles en échangeant de l'information (Hoffman et Jorgenson (1977)). L'attrait de cette méthode est qu'aucune modification des modèles n'est nécessaire. Il s'agit uniquement d'un échange de données entre les deux modèles ;
- une deuxième option vise à calibrer les équations du modèle macro-économique sur la base de simulation du modèle *Bottom-up*. On utilise donc le modèle énergétique afin de simuler l'éventail des options technologiques et on estime les élasticités du modèle macro-économique sur la base de cet ensemble de simulations (Schäfer et H. Jacoby (2006)).
- une autre possibilité envisagée consiste à remplacer une partie des équations du modèle macro-économique pour un secteur bien précis par les équations du modèle énergétique, cette option a souvent été mise en œuvre dans le cadre du secteur électrique (Wing (2006)) ;
- une quatrième voie revient à intégrer au sein du modèle énergétique des équations représentant l'équilibre macro-économique. Le modèle MERGE retient cette option (Manne et R.G. Richels (1992)) ;
- enfin, la dernière voie, certainement la plus complète et la plus ambitieuse, consiste à ne créer qu'un seul modèle retenant les équations des deux modèles en excluant les recouvrements d'équations et à résoudre ce modèle unique à l'aide d'un seul algorithme (Böhringer et Rutherford (2005,2006)).

Notre travail, qui s'inscrit dans cette lignée, doit prendre en compte les deux contraintes suivantes :

- Tout d'abord, nous disposons de deux modèles existants et il n'était pas question de modifier de façon importante la structure et le mode de résolution des deux modèles ;
- ensuite, ces deux modèles ont, par leur intégration des activités économiques et énergétiques à l'échelle mondiale, une taille très importante, c'est-à-dire plusieurs milliers d'équations, ce qui bien évidemment nous contraint dans la recherche d'un protocole de couplage, dont un des éléments essentiels devait être son caractère opérationnel.

Cette étude nous aura permis de proposer deux types de couplage :

- Une **utilisation harmonisée** des deux modèles, et la plupart des simulations proposées dans ce travail utilise *a minima* cette procédure ;
- Une **utilisation couplée** des deux modèles, ce couplage « exploratoire » a été mis en œuvre avec succès et ouvre la voie vers des utilisations plus larges à terme.

### **Une utilisation harmonisée des modèles TIAM et GEMINI-E3**

Cette approche consiste à harmoniser les jeux d'hypothèses des deux modèles de façon à pouvoir étudier une même question sur la base des simulations des deux modèles. Compte tenu de ce corps d'hypothèses communes, les différences de réponses des deux modèles permettent d'encadrer nos résultats compte tenu de représentations économiques basées sur des structures de modélisation différentes. Les différences ou points communs sont autant d'information qui permettent de nourrir la réflexion. Cette utilisation harmonisée est réalisée en 3 étapes :

#### **Etape 1 : Constitution d'un corps d'hypothèses communes**

Cette étape consiste à définir les hypothèses sur lesquelles sont basés nos scénarios. Ces hypothèses englobent les données démographiques, les conditions futures sur l'évolution des technologies, les hypothèses de fonctionnement des marchés etc. Certaines de ces hypothèses, que nous appellerons exogènes, sont de nature quantitative (c'est le cas de l'évolution de la population), d'autres sont plus qualitatives et conduisent à des codages différents au sein des modèles.

#### **Etape 2 : Calcul de certains 'drivers' macro-économiques de TIAM sur la base des simulations de GEMINI-E3**

Nous simulons le modèle GEMINI-E3 afin d'obtenir un premier jeu de résultats sur les conditions macro-économiques de la croissance et son allocation sectorielle. Ces résultats sont utilisés pour déterminer l'évolution des *drivers* macro-économiques de TIAM, à partir desquels sont calculées les valeurs des demandes en services énergétiques de référence de TIAM. En pratique, les informations transférées de GEMINI-E3 à TIAM à cette étape ont trait à l'évolution du Produit Intérieur Brut (PIB) par pays et à la répartition de la valeur ajoutée par secteur (services, pâtes et papiers, etc.).

#### **Etape 3 : Calcul des prix des énergies de GEMINI-E3 sur la base des simulations de TIAM**

Les simulations de TIAM sur la base des hypothèses de croissance de GEMINI-E3 nous donnent un jeu de prix du pétrole brut et du gaz naturel qui sont injectés comme valeurs exogènes dans le modèle GEMINI-E3.

Les étapes 2 et 3 peuvent être exécutées plusieurs fois de manière à obtenir un jeu d'hypothèses stabilisées sur la croissance économique (et son allocation sectorielle) et le prix des énergies. La procédure ainsi mise en place est complètement opérationnelle, elle a été utilisée pour réaliser plusieurs études et a montré tout son intérêt.

## Une utilisation couplée des modèles TIAM et GEMINI-E3

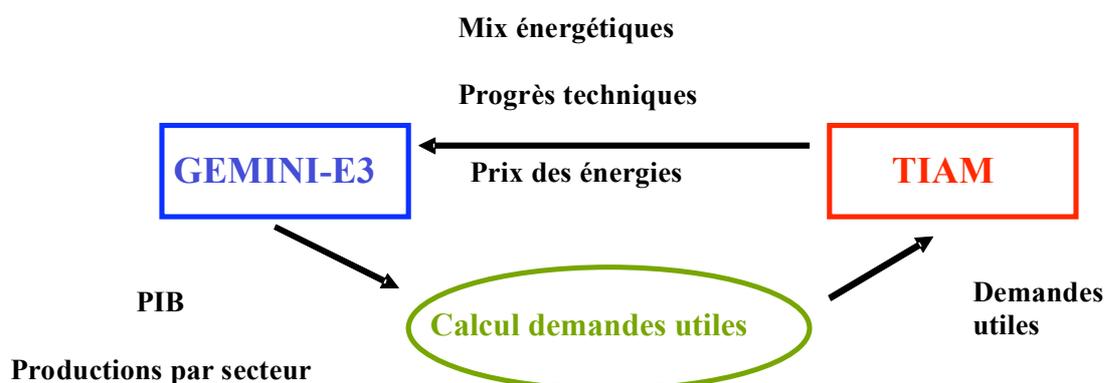
Le couplage mis en œuvre dans cette section est plus ambitieux et vise à injecter au sein de GEMINI-E3 les mix énergétiques de TIAM et en contrepartie à modifier les drivers de TIAM sur la base du bouclage macro-économique de GEMINI-E3. Les premiers résultats obtenus montrent la faisabilité d'un tel couplage même si sa maîtrise est d'une réelle complexité et que des travaux supplémentaires apparaissent nécessaires pour le rendre opérationnel de façon routinière. Un premier couplage a été mené à terme et a permis de valider la faisabilité du protocole envisagé et développé dans cette étude. Les étapes suivantes sont nécessaires à la réalisation du couplage.

### Harmoniser les nomenclatures des deux modèles

TIAM et GEMINI-E3 reposent sur des bases de données technologiques et économiques différentes, au plan de leur structure et de leur désagrégation géographiques, et qui conditionnent en partie le niveau de description retenu par chacun d'eux. TIAM est basé principalement sur les bilans physiques de l'énergie alors que GEMINI-E3 est basé sur la comptabilité nationale et les tableaux entrées-sorties. Il faut donc réaliser une première étape d'harmonisation entre les deux modèles consistant à faire correspondre leurs nomenclatures respectives afin de permettre aux modèles de dialoguer.

Concernant la nomenclature géographique, nous avons agrégé les régions du modèle GEMINI-E3 en vue d'obtenir une nomenclature la plus proche possible de celle de TIAM. Concernant les nomenclatures sectorielles et de produit, le travail a été plus ardu et a consisté à réaliser des matrices de transformation entre les nomenclatures des deux modèles.

Figure 1 : Couplage des modèles TIAM et GEMINI-E3



### L'algorithme de couplage

L'algorithme de couplage retenu est représenté par la figure 1. Il consiste à injecter dans GEMINI-E3 des informations sur le mix énergétique et les progrès techniques dans le domaine de l'utilisation de l'énergie ainsi que les prix des énergies, tous issus des résultats du modèle TIAM. Une fois ces paramètres injectés dans GEMINI-E3, ce dernier renvoie en retour l'évolution du PIB et des productions par secteur qui sont utilisées pour calculer les drivers de TIAM (voir paragraphe « utilisation harmonisée »). Cette procédure est répétée de façon itérative.

Le tableau 1 détaille les différentes étapes du couplage.

Tableau 1 : Étapes du couplage des modèles TIAM et GEMINI-E3

- 
1. Initialisation des demandes utiles  $D_0$   
Itération  $k = 0$
  2. Simuler TIAM avec les demandes  $D_k$   
Récupérer les mix énergétiques  $F_k$ , prix des énergies  $P_k$  et progrès techniques  $\theta_k$
  3. Simuler GEMINI-E3 avec  $F_k$ ,  $P_k$  et  $\theta_k$   
Récupérer le PIB et les productions par secteur  
Calculer les demandes utiles  $D_{k+1}$
  4. Evaluation du critère de convergence  $\gamma = \|D_{k+1} - D_k\|$
  5. Incrémenter  $k$
  6. Si  $\gamma \geq \epsilon$  alors aller en 2.
- 

### L'intégration au sein des modèles TIAM et GEMINI-E3

Un des préalables au couplage était de modifier *a minima* la structure des deux modèles. En pratique, aucune modification de la structure de TIAM n'a été nécessaire, seule la création d'une interface de calcul des *drivers* a été réalisée. Un travail plus important a été mené sur le modèle GEMINI-E3. L'incorporation des mix énergétiques et des progrès techniques issus de TIAM dans GEMINI-E3 a été réalisée en conservant la structure des fonctions de production basées sur des CES emboîtées. Concrètement, nous avons supposé que les élasticités des CES représentant le choix des énergies étaient égales à zéro, les fonctions de production se résumant alors à des fonctions Léontieff à coefficients fixes déterminés par la solution du modèle TIAM. Pour la fonction de consommation des ménages, basée dans le modèle GEMINI-E3 standard sur une fonction Stone-Geary, nous avons réécrit ces fonctions sous forme de CES emboîtées et retenu la même procédure que celle utilisée pour l'activité de production.

### Critère de convergence

La convergence est supposée atteinte lorsque la distance obtenue par la norme euclidienne entre deux demandes utiles successives est inférieure à un seuil choisi par le modélisateur.

### Un exemple : un scénario de réduction du réchauffement climatique à 3.5W/m<sup>2</sup>

Nous présentons ci-après les résultats d'un scénario visant à limiter le réchauffement du climat à 3.5W/m<sup>2</sup> à l'aide du système couplé TIAM-GEMINI-E3. La convergence est obtenue en 26 itérations, et l'évolution du critère de convergence est donnée en figure 2. On s'aperçoit que les demandes ont tendance à exhiber des phénomènes oscillatoires peu prononcés, issus des échanges du commerce extérieur des industries intensives en énergie, très sensibles dans GEMINI-E3 aux prix des énergies, et de la structure du mix énergétique dans TIAM pour ces mêmes industries, sensible elle à la dynamique de l'évolution de la production totale au sein de ces mêmes secteurs. Au final, le critère de convergence diminue significativement à partir de la quinzième itération.

Nous présentons ci-après les différences de résultats obtenus à l'itération 0 et 26, ce qui permet d'évaluer l'attrait du couplage des modèles GEMINI-E3-TIAM. Le premier élément de comparaison est lié à la taxe sur le CO<sub>2</sub>, la prise en compte du couplage permet de diminuer de 4% cette valeur, ce qui s'explique par la baisse de demande de services énergétiques de la part principalement des industries intensives en énergie dont la production baisse au sein du modèle GEMINI-E3 suite à des substitutions en faveur de biens et services peu consommateurs d'énergie. La figure 3 présente cette taxe sur le CO<sub>2</sub> et le prix du pétrole qui lui reste sensiblement inchangé après le couplage.

Figure 2 : Evolution du critère de convergence (à gauche de l'itération 1 à l'itération 26 – à droite de l'itération 3 à 26) en pourcentage

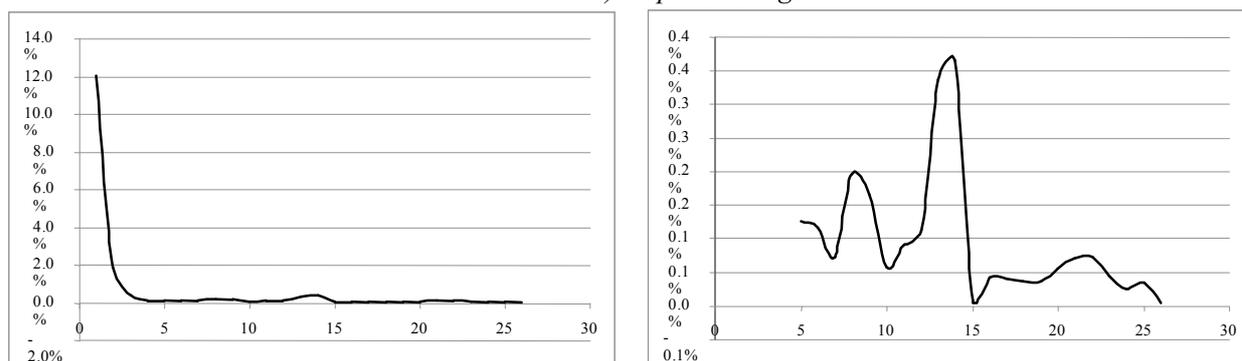


Figure 3 : Prix du CO<sub>2</sub> (à gauche) et prix du pétrole (à droite)

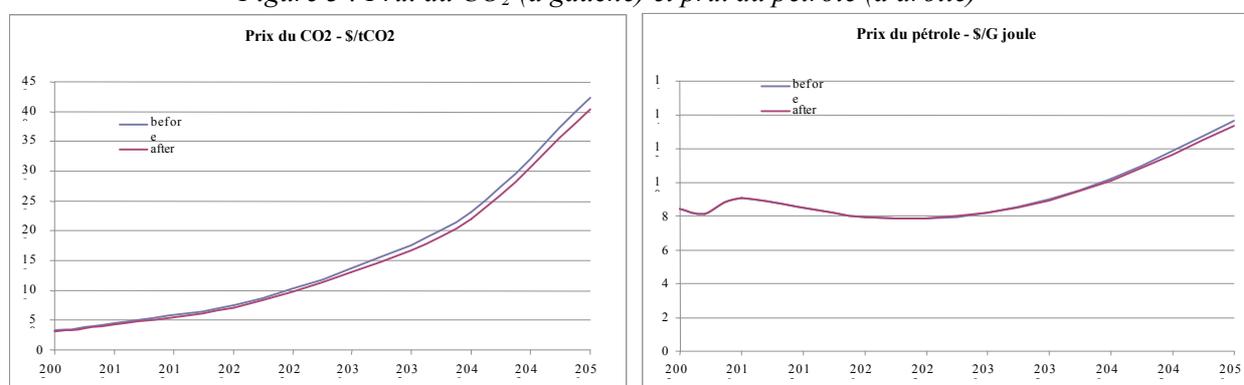
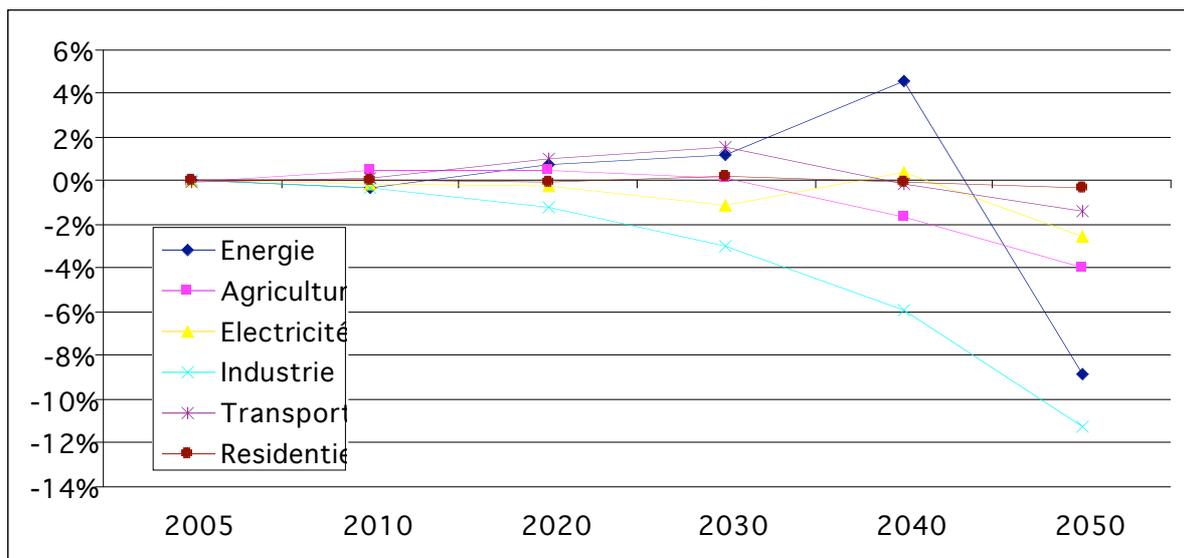


Tableau 2 : Variation en pourcentage de la consommation d'énergie entre les itérations 0 et 26

	2005	2007	2010	2020	2030	2040	2050
Alcool	0%	0%	0%	-50%	-19%	-9%	-4%
Biofuel	0%	0%	-2%	-3%	-1%	1%	1%
Charbon	0%	0%	3%	0%	1%	9%	-13%
Electricité	0%	0%	0%	0%	-1%	-3%	-7%
Gaz Naturel	0%	0%	-2%	3%	2%	37%	-6%
Chaleur	0%	0%	-4%	0%	0%	4%	4%
Nucléaire	0%	0%	0%	0%	0%	1%	2%
Produits Pétroliers	0%	0%	0%	3%	5%	3%	0%
Renouvelable	0%	-1%	0%	0%	-1%	-29%	-6%
<b>Total</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>2%</b>	<b>-5%</b>

Figure 4 : Variation de la consommation d'énergie par secteur en %



Le tableau 2 présente les variations des consommations d'énergie en pourcentage ; il est complété par la figure 4 qui donne les variations en pourcentage de la consommation d'énergie par secteur. Les consommations totales des secteurs résidentiel et transports sont peu affectées par le couplage. Celles de l'agriculture et du secteur électrique sont modérément modifiées (entre 2 et 4%). Enfin comme nous l'avons mentionné, la consommation d'énergie du secteur industriel (figure 4) est très affectée suite à une baisse de production dans ce secteur. Au sein des consommations d'énergie du secteur industriel, le changement d'activités industrielles a un impact sur l'électricité en ce qui concerne les consommations aux fins énergétiques, mais aussi de plus importants impacts sur les intrants non énergétiques (*feedstocks*): charbon, gaz, pétrole varient alors aussi fortement. Dans le transport, les alcools apparaissent bien moins intéressants dans la version couplée (pétrole et gaz sont préférés).

## Conclusion

Dans le cadre de ce projet nous avons mis en œuvre deux types de couplage entre les modèles TIAM et GEMINI-E3 :

- Une utilisation harmonisée, que nous pourrions appeler « couplage léger » ;
- Une utilisation couplée, appelée à contrario « couplage complet ».

Ces deux méthodes sont opérationnelles et permettent d'enrichir mutuellement les résultats des deux modèles. L'utilisation harmonisée des modèles TIAM-GEMINI-E3, mise en œuvre par défaut dans toutes les simulations réalisées pour cette étude, permet de consolider les soubassements économiques des hypothèses de prix des énergies utilisées dans GEMINI-E3 et de fournir en retour au modèle TIAM un ensemble d'évolution des demandes utiles à forte cohérence macro-économique.

Le couplage « complet » entre TIAM et GEMINI-E3 est plus ambitieux mais aussi plus lourd à mettre en œuvre. Ce programme de recherche aura permis de définir un protocole de couplage adapté et original, et de le tester sur une simulation. Les résultats montrent que ce couplage, s'il ne modifie pas de façon majeure les résultats de TIAM, apporte cependant un éclairage intéressant sur le secteur industriel dont les productions varient de façon importante, variations qui peuvent s'expliquer par deux mécanismes :

- Une substitution entre biens intensifs en énergie (acier, chimie, etc) par des biens et services moins consommateurs d'énergie au niveau des consommations intermédiaires et des demandes finales, qui peut s'interpréter comme une décarbonisation de nos modes de vie<sup>4</sup> ;
- Une réaffectation géographique (délocalisation) des productions au vu des nouveaux avantages comparatifs issus de la mise en place de technologies décarbonées de production. Ce second point semble ainsi indiquer que même si l'on suppose que l'ensemble des pays mettent en place une taxe carbone, il peut y avoir des délocalisations de production qui peuvent constituer des freins à l'adoption de politiques de réduction des gaz à effet de serre.

Ces deux derniers résultats issus d'une première utilisation couplée des modèles TIAM et GEMINI-E3 devront être confirmés par des travaux ultérieurs, mais ils montrent tout l'intérêt de coupler un modèle *bottom-up* avec un modèle *top-down*.

## Bibliographie

1. C. Böhringer. *The synthesis of bottom-up and top-down in energy policy modeling*. Energy Economics, 20:233–248, 1998.
2. C. Böhringer and T.F. Rutherford. *Integrating bottom-up into top-down: a mixed complementarity approach*. Discussion Paper 05–28, Center for European Economic Research, 2005.
3. C. Böhringer and T.F. Rutherford. *Combining top-down and bottom-up in energy policy analysis: a decomposition approach*. Discussion Paper 06–007, Center for European Economic Research, 2006.
4. K.C. Hoffman and D.W. Jorgenson. *Economic and technological models for evaluation of energy policy*. The Bell Journal of Economics, 8(2):444–466, Autumn 1977.
  - A. Schäfer and H. Jacoby. *Experiments with a Hybrid CGE-MARKAL Model*. Energy Journal, Special Issue: Hybrid modeling of Energy-Environment Policies: Reconciling Bottom-up and Top-down:171–177, 2006.
5. A.S. Manne and R.G. Richels. *Buying greenhouse insurance: the economic costs of CO<sub>2</sub> emission limits*. The MIT Press, Cambridge, 1992.
6. I.Wing. *The synthesis of bottom-up and top-down approaches to climate policy: Electric power technologies and the cost of limiting US CO<sub>2</sub> emissions*. Energy Policy, 34:3847–3869, 2006.

---

<sup>4</sup> Ces substitutions recouvrent plusieurs dimensions comme par exemple : des substitutions de matériaux de construction classique par du bois, une dématérialisation de l'économie, l'utilisation de visio-conférences à la place de déplacement physique...



## 5. Modélisation du comportement de l'OPEP face à une politique climatique globale

### Objectifs

Dans le contexte d'une réduction mondiale des émissions de GES, les prix des différentes énergies peuvent jouer un rôle appréciable dans la mesure où ils influencent les substitutions énergétiques et technologiques. Le prix est particulièrement important car le commerce de cette ressource est pour une part importante sous le contrôle du cartel OPEP. Notre premier objectif dans cette partie du projet est de modéliser le comportement du cartel de façon à affiner notre analyse du comportement futur du prix du pétrole, dans l'hypothèse d'un scénario de lutte au réchauffement climatique. En effet, par l'imposition de quotas de production, l'OPEP peut augmenter ses revenus nets de long terme en provoquant une augmentation du prix du pétrole et/ou en augmentant ses exportations. La position dominante du cartel dans le marché des exportations de pétrole lui permet de jouer un rôle de meneur dans un jeu à deux niveaux, par exemple en restreignant l'offre de pétrole par le cartel, ce qui est le levier le plus courant de cette organisation. Les producteurs non-OPEP, agissant en suiveurs, peuvent (doivent) alors ajuster leurs propres niveaux de production de façon à satisfaire la demande mondiale, demande qui d'ailleurs est elle-même sujette à fluctuation selon le prix du pétrole. La figure 1 montre de façon schématique comment l'imposition d'un quota OPEP provoque un changement de l'équilibre offre-demande.

Le but premier de cette étude est la détermination des quotas de production optimaux (pour l'OPEP), et des réactions des autres acteurs (autres producteurs, et consommateurs), dans deux scénarios contrastés :

- un scénario de référence ;
- un scénario de lutte active contre le réchauffement climatique dans lequel tous les pays s'entendent pour maintenir le forçage radiatif au niveau de 3,5 Watts/m<sup>2</sup> en 2100.

A priori, la politique de quotas de l'OPEP en présence d'un scénario mondial de lutte aux changements climatiques n'est pas évidente : l'OPEP pourrait soit *réduire* sa production de façon à augmenter le prix du pétrole, soit au contraire *augmenter* sa production pour réduire le prix mondial du pétrole et induire un rebond de la demande. L'étude quantifiée des quotas permettrait donc de clarifier (au moins qualitativement) laquelle de ces deux stratégies devrait prévaloir.

La détermination des quotas optimaux de l'OPEP permettrait aussi de calculer les impacts d'une telle politique sur les choix énergétiques mondiaux, sur la lutte au réchauffement climatique, et sur le coût supplémentaire encouru par le reste de la planète à cause des quotas. En particulier, il serait intéressant de savoir si les politiques de l'OPEP sont en mesure de constituer une résistance appréciable aux efforts de réduction des émissions de GES par la planète.

### Méthodologie

L'étude des quotas OPEP optimaux a été réalisée au moyen du modèle technico-économique mondial (ETSAP-TIAM) qui permet de représenter de manière explicite, détaillée et intégrée, à la fois les ressources pétrolières de chaque région, les réactions des consommateurs de pétrole aux décisions de l'OPEP, et les changements technologiques nécessaires à la satisfaction, le cas échéant, d'un objectif de lutte contre les changements climatiques.

Pour chacun des deux scénarios cités plus haut, nous avons simulé une série de quotas de production par l'OPEP. Tout d'abord, nous avons supposé que l'OPEP n'imposait aucun quota, ce qui revient à supposer que l'équilibre offre-demande du pétrole est concurrentiel. Ensuite, nous avons effectué une série de passages du modèle, chaque passage supposant que le niveau de production OPEP était égal à

un certain pourcentage du niveau calculé dans l'équilibre concurrentiel (le même pourcentage prévalant tout au long du 21<sup>ème</sup> siècle). Les pourcentages choisis couvrent l'intervalle allant de 50% à 150% du niveau concurrentiel, par accroissements de 10% (le niveau 100% est celui de l'équilibre concurrentiel).

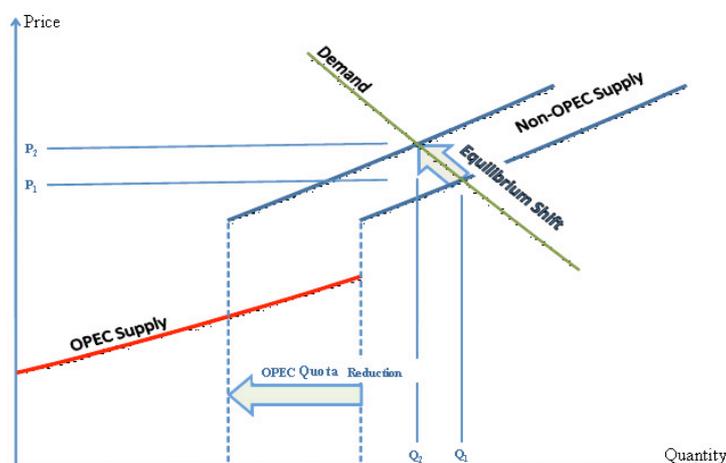


Figure 1. Impact des quotas OPEP sur l'équilibre

Mathématiquement, la situation simulée est celle d'une optimisation bi-niveau, apparentée à un jeu de Stackelberg de type *open-loop*.

Pour chaque politique de quotas (c'est-à-dire chaque passage du modèle), nous obtenons les niveaux de production de pétrole par toutes les régions, le prix mondial du pétrole, le niveau des exportations par l'OPEP, et enfin le revenu net des exportations de pétrole par l'OPEP. De plus, le modèle permet de calculer la perte de bien-être mondial afférente à chaque niveau de quota postulé.

Bien que d'autres auteurs se soient intéressés à la même question générale des quotas (Pindyck [15,16], Salant [18] et autres auteurs [1, 2, 4, 10], [6], [3]), notre recherche se distingue par l'emploi d'un modèle où les réserves de pétrole, les contraintes de production, les substitutions énergétiques, et les stratégies de réductions des émissions sont toutes modélisées de façon fine et explicite, permettant une analyse détaillée des réactions des acteurs aux décisions de l'OPEP.

## Limites

Notre approche demeure approximative pour deux raisons : premièrement, nous supposons que l'OPEP décide de ses quotas en une seule fois pour l'ensemble des périodes futures, alors que dans la réalité, une stratégie optimale pourrait consister en une stratégie *dynamique* en « boucle fermée » s'adaptant à chaque période de temps à l'information réellement disponible à cette période. Deuxièmement, notre analyse néglige des éléments qui influent eux aussi sur les prix du pétrole, du moins dans le court terme tel que :

- réductions non prévisibles (par causes naturelles ou non) de la capacité de production ou de raffinage du pétrole ;
- décisions non concurrentielles par les raffineurs (exercice d'un pouvoir de marché) ;
- manque de flexibilité des producteurs non-OPEP ;
- spéculation par des agents qui stockeraient la ressource (réellement ou virtuellement) pour en modifier le prix.

Notons cependant que ces phénomènes ont lieu à une échelle de temps beaucoup plus courte que celle considérée dans la lutte aux changements climatiques.

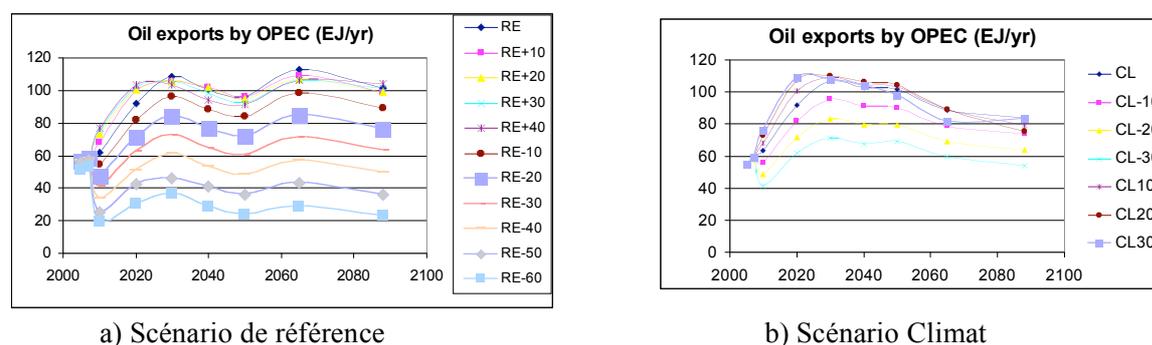
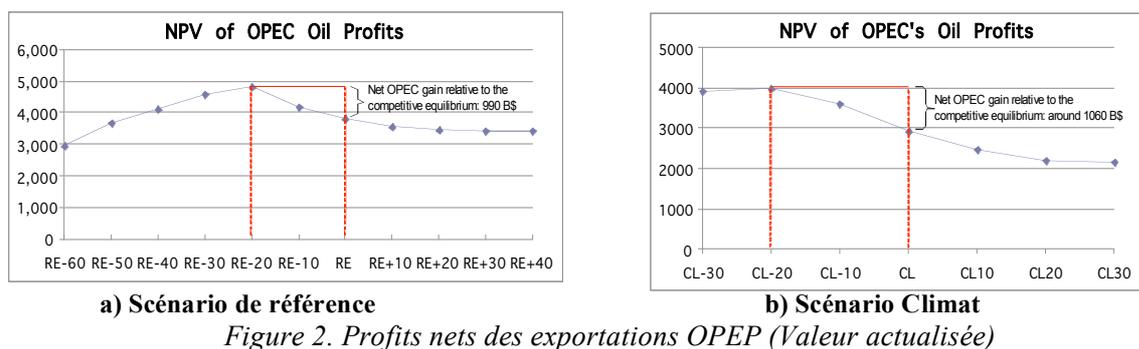
En dépit de ces limites, nous croyons que notre analyse peut donner une indication utile de la nature des stratégies de quotas de l'OPEP, ainsi que de leur influence dans le long terme. De plus, une analyse *dynamique* du jeu à deux niveaux est notoirement difficile.

## Principaux résultats de l'étude

### Quotas et profits OPEP optimaux

Le calcul des profits résultant des exportations de pétrole par l'OPEP dans les deux scénarios montre que la stratégie optimale est de situer la production de pétrole à 80% du niveau de production dans l'équilibre concurrentiel. Ce niveau est le même (en pourcentage) dans les deux scénarios, mais diffère en valeur absolue puisque l'équilibre concurrentiel est très différent dans les deux scénarios. Ce résultat montre donc que la stratégie optimale pour l'OPEP n'est pas d'inonder le marché de pétrole bon marché (ce que nous savions déjà dans le cas d'un scénario de base, et qui est donc confirmé dans le cas d'un scénario climatique sévère).

La figure 2 montre le profit total actualisé de l'OPEP pour tous les quotas et les deux scénarios. On y remarque qu'en réduisant sa production de 20% par rapport à l'équilibre concurrentiel, l'OPEP augmente son profit de 990 G\$ dans le scénario de référence et de 1060 G\$ dans le scénario climatique. De plus, le profit optimal est 24% plus élevé dans le scénario de référence que dans le scénario climatique (5000G\$ contre 4000G\$ environ). Cette perte de profit est surtout le résultat de la diminution du prix du pétrole dans le scénario climatique (figure 4) plus que la diminution des exportations, qui demeure limitée (figure 3). Nous verrons que ce sont surtout les pays non OPEP qui supportant la diminution de la consommation mondiale de pétrole.



### Prix du pétrole

La figure 4 montre a) que le resserrement des quotas a une grande influence sur le prix du pétrole, et b) que le prix optimal du pétrole est généralement plus bas dans le scénario climatique, ce qui s'explique par la demande plus basse en produits pétroliers. En 2050, la stratégie optimale de l'OPEP résulte en un prix de 80\$/bbl dans le cas de référence, et de seulement 60\$ dans le cas climatique.

Ceci explique les profits plus bas dans ce dernier scénario. Les prix sont plus rapprochés à la fin du siècle.

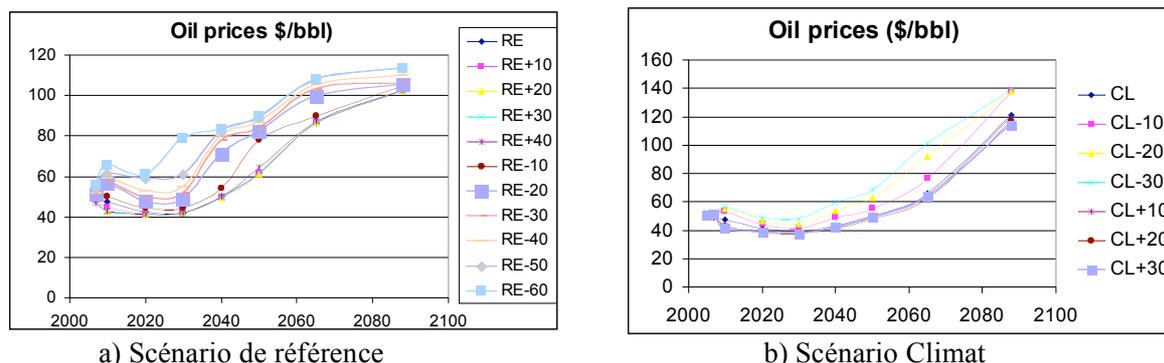


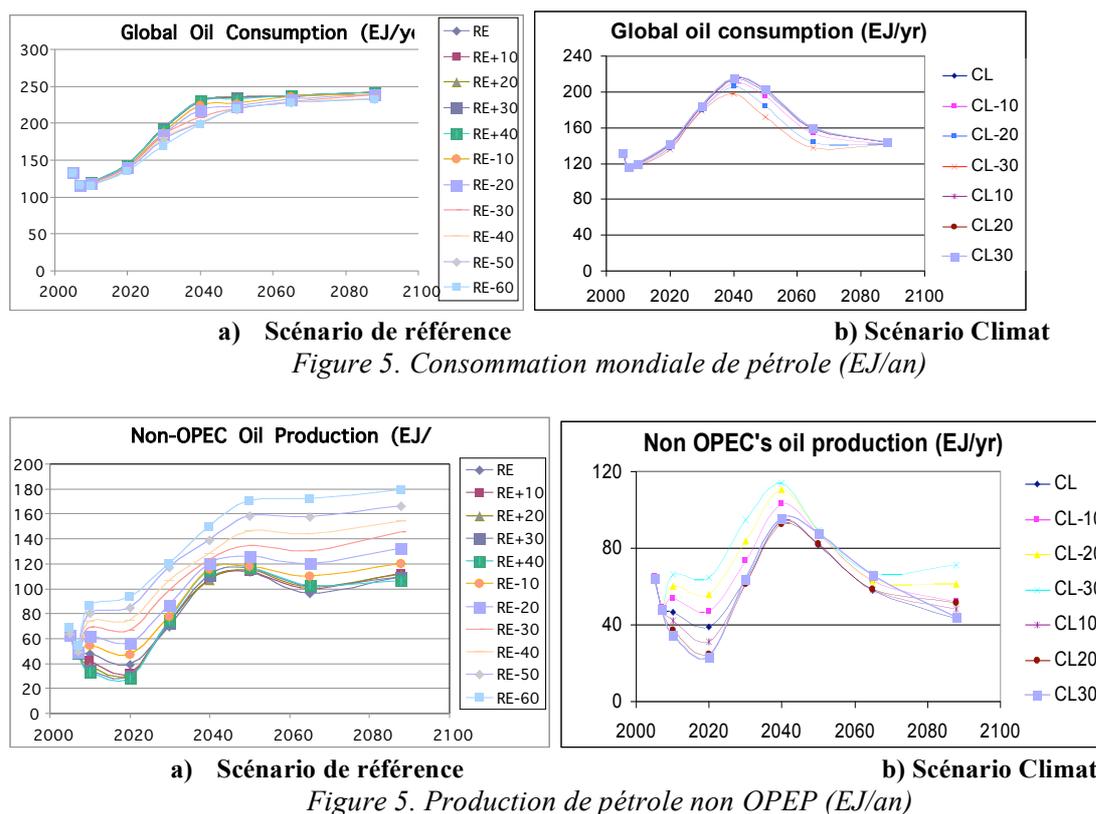
Figure 4. Prix du pétrole

## Réaction des suiveurs

- Les autres producteurs de pétrole subissent des baisses majeures de production en présence de la cible climatique. La figure 5 montre clairement que les producteurs hors OPEP supportent presque exclusivement la baisse de demande mondiale de pétrole induite par le scénario climatique. Dans ce scénario, leur production décline de façon marquée après 2040 alors qu'elle restait à peu près stable dans le scénario de référence. Cette constatation est valable pour tous les niveaux de quotas et donc aussi pour la stratégie optimale.
- Les trajectoires de la consommation mondiale de pétrole suivent la même tendance que celles de la production non OPEP, comme le montre la figure 5, qui accuse un pic de consommation (en 2040) dans le scénario climatique, mais non pas dans le scénario de référence.
- Les autres secteurs sont affectés de façon diverse:
  - la consommation de gaz naturel augmente lorsque l'OPEP resserre ses quotas, notamment parce que la production des sables bitumineux, grands consommateurs de gaz, augmente fortement;
  - dans le secteur des transports, le passage aux carburants alternatifs est avancé par le resserrement des quotas, sous l'effet de l'augmentation du prix du pétrole qui découle des quotas;
  - Industrie: dans le scénario de référence, le charbon devient plus attractif quand le prix du pétrole augmente (suite au resserrement des quotas, renforcé par la consommation accrue de gaz mentionnée ci-dessus). L'industrie est peu affectée dans le scénario climat;
  - Les secteurs électrique et des bâtiments sont peu affectés par les quotas;
  - Les émissions globales de GES sont insensibles aux quotas dans le scénario climatique, et peu affectées dans le scénario de référence. On y note tout au plus un décalage des émissions.

## Impact sur le bien-être global

L'adoption de quotas optimaux par l'OPEP induit bien sûr une diminution du bien-être global, puisque ce dernier est par définition maximal dans l'équilibre concurrentiel. Cette perte s'élève à 700 G\$ dans la référence et à 530 G\$ dans le cas climatique. Comme le surplus de l'OPEP augmente en présence des quotas, le reste du monde subit une perte d'autant plus grande, s'élevant à 1700 G\$ et à 1600 G\$ respectivement dans ces deux scénarios.



## Conclusion

Notre étude montre que les stratégies de production de l'OPEP ont un impact significatif sur les prix du pétrole, qu'il y ait accord mondial sur les changements climatiques (scénario climatique) ou pas (scénario de référence). Le pouvoir de marché de l'OPEP, mesuré par son impact sur le bien-être total, est non négligeable, mais reste modéré, et les impacts des stratégies de l'OPEP sur les émissions et le climat sont limités. Dans le scénario climatique, l'OPEP ne tire aucun avantage à « inonder » le marché en augmentant sa production : la contrainte climatique a plus de poids que les stratégies de production de l'OPEP. On observe même un effet positif des quotas dans le scénario climatique, car les quotas renforcent les décisions technologiques prises pour atténuer les émissions de gaz à effet de serre. Finalement, l'accord climatique faisant baisser les profits de l'OPEP en comparaison au scénario de référence, l'OPEP pourrait être réticente à s'engager dans un tel accord (en considérant sa décision fondée seulement sur les profits tirés des exportations de pétrole, ce qui est une approximation).

## Bibliographie

1. Aune F.R., S. Kverndokk, L. Lindholt and K.E. Rosendahl, Profitability of different instruments in international climate policies, Discussion Paper No. 403, Statistics Norway, Research Department, Jan. 2005.
2. Bernard A. and M. Vielle, (2008). GEMINI-E3, a general equilibrium model for international national interactions between economy energy and the environment, *Computational Management Science*, Special issue "Managing Energy and the Environment", Vol. 5, Issue 1, pp.173-206.
3. Berg, E., S. Kverndokk and K. E. Rosendahl (2002): Oil Exploration under Climate Treaties, *Journal of Environmental Economics and Management*, 44 (3), 493-516.
4. Berndt, E.R., & Wood, D.O. (1975). Technology, prices, and the derived demand for energy. *The Review of Economics and Statistics*, 57 (3), 259-268.

5. Ghanem, S., Lounnas, R., Brennand, G. The impact of emissions trading on OPEC, *OPEC Review June*, 23 (2), 79–112, 1999.
6. Haurie A. et M. Vielle, Le cartel du pétrole et les politiques climatiques mondiales: une analyse par la théorie des jeux, (2007), in R. Kaufmann et P. Bürger eds. *Recherche dans le domaine du développement durable—perspectives des sciences sociales et humaines*, Académie suisse des sciences humaines et sociales.
7. Hotelling, Harold. "The Economics of Exhaustible Resources." *Journal of Political Economy* 39, no. 2 (1931): 137–175.
8. IPCC (2001). Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York NY, USA, 881.
9. IPCC (2007). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
10. Kverndokk S., L. Lindholt and K.E. Rosendahl, (2000). Stabilisation of CO<sub>2</sub> concentrations: mitigation scenarios using the PETRO model, *Environmental Economics and Policy Studies*, 3 (2), pp 195-224.
11. Loulou R. (2008)- ETSAP-TIAM: the TIMES integrated assessment model Part II: Mathematical formulation, *Computational Management Science*, Vol. 5 (1–2) pp. 41-66.
12. Loulou R. and M. Labriet, (2008). ETSAP-TIAM: the TIMES integrated assessment model Part I: Model structure, *Computational Management Science*, Vol. 5 (1–2) pp. 7-40. 28.
13. Nordhaus W. D. and J. Boyer, 1999, Roll the DICE Again: Economic Models of Global Warming, Yale University, manuscript edition.
14. Pindyck, R S, (1978). Gains to Producers from the Cartelization of Exhaustible Resources. *Review of Economics and Statistics* 60, 238-251.
15. Pindyck, R.S. (1980). Uncertainty and exhaustible resource markets. *The Journal of Political Economy*, 88 (6), 1203-1225.
16. Remme U., M. Blesl, U. Fahl, (2007). Global resources and energy trade: An overview for coal, natural gas, oil and uranium. IER, Stuttgart, 101 p..  
<http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2007/3252/>
17. Salant Stephen W., Exhaustible Resources and Industrial Structure: A Nash-Cournot Approach to the World Oil Market, *Journal of Political Economy*, 84 (5), 1079-1093.
18. Sathaye J., Makundi W., Dale L., Chan P., and Andrasko K. (2005). Estimating Global Forestry GHG Mitigation Potential and Costs: A Dynamic Partial Equilibrium. Approach. LBNL 55743.
19. Tirolle J. (1988), *The Theory of Industrial Organization*, Cambridge (Mass.), MIT Press.
20. US-DOE EIA database. <http://www.eia.doe.gov/>.

## 6. Vers un partage d'un budget d'émissions de GES

Nous présentons dans ce chapitre les résultats d'une simulation technico-économique basée sur un modèle de « jeu couplé » visant à définir le partage d'un budget d'émission, compte tenu d'un objectif global de limitation du réchauffement climatique. Dans ce chapitre nous utilisons le modèle GEMINI-E3 harmonisé avec le modèle TIAM (cf. le chapitre 5 de ce rapport) pour résoudre un jeu non coopératif dans lequel les pays (ou joueurs) affectent temporellement un budget qui leur a été préalablement accordé sur la base de critères explicites d'attribution de droits d'émissions.

### Le modèle GEMINI-E3

Nous avons utilisé un modèle GEMINI-E3 agrégé en quatre zones géographiques, respectivement l'Amérique du Nord et l'Océanie (*NAM*), les autres pays de l'OCDE (*OEC*), les principaux pays exportateurs de pétrole (*EEC*) et les pays en développement (*PVD*). Le tableau 1 présente l'agrégation retenue par rapport à la nomenclature du modèle GEMINI-E3 standard.

Tableau 1 : Nomenclature du modèle GEMINI-E3 retenu pour le jeu couplé

Modèle GEMINI-E3 4 zones		Région GEMINI-E3
Amérique du Nord	NAM	Etats-Unis Canada Mexique Australie et Nouvelle Zélande
Autres pays de l'OCDE	OEC	Allemagne France Royaume-Uni Italie Espagne Pays-Bas Belgique Suisse Pologne Autres pays de l'Union Européenne Autres pays européens Turquie Japon Reste de l'Union Soviétique
Pays en voie de développement	PVD	Tunisie Brésil Inde Chine Reste de l'Asie Reste de l'Amérique Latine Afrique
Pays exportateur d'énergie	EEC	Russie Moyen Orient Venezuela

### Le Compte de référence

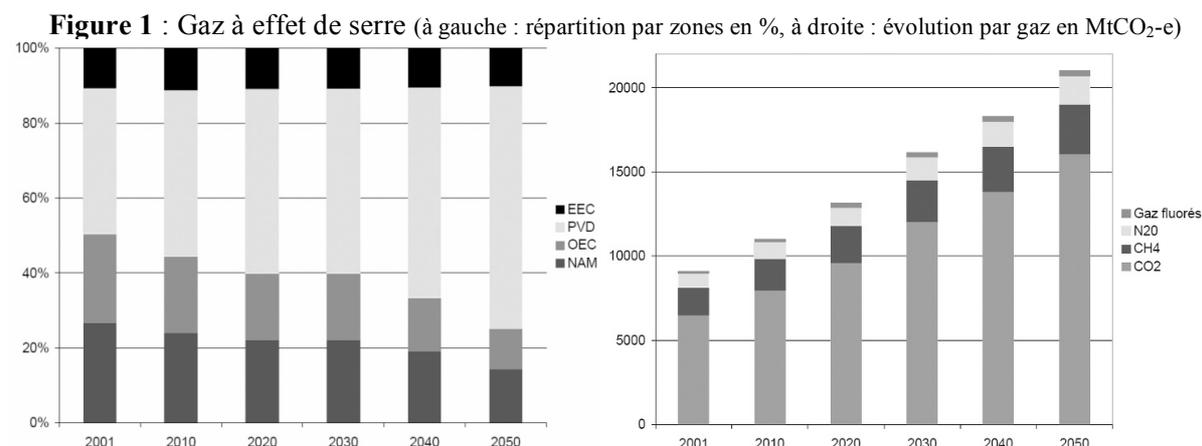
L'évolution démographique retenue est basée sur les travaux des Nations Unies. Seule la zone OEC ferait face sur la période 2001-2050 à une stagnation de sa population. Les autres zones seraient caractérisées par une croissance de leur population qui augmente sur la période de 39% pour NAM, de 59% pour les PVD et de 49% pour la zone EEC. En 2050 la population mondiale atteindrait 9 milliards d'individus.

Le compte de référence est basé sur un scénario harmonisé avec le modèle TIAM, les hypothèses de croissance économique sont harmonisées et les prix des énergies utilisés dans GEMINI-E3 sont fournis par les résultats de simulation du modèle TIAM. La croissance mondiale retenue est de 2,7% sur la période 2010-2050. Les PVD connaîtraient la croissance la plus soutenue égale à 4,3%, les pays industrialisés (NAM et OEC) feraient face à une croissance faible respectivement égale à 2,2% et 1,6% par an. La croissance économique de la zone EEC serait de 3,2% par an. Le tableau 2 présente les hypothèses de prix du pétrole brut et du gaz naturel pour le marché européen, asiatique et américain.

Tableau 2 : Prix des énergies (\$ par Gigajoule)

	Pétrole	Gaz naturel		
		Europe	Asie	Amérique
2010	8.03	5.23	5.42	4.29
2020	7.56	5.47	5.00	4.83
2030	8.25	6.61	7.54	5.18
2040	12.19	7.88	8.95	7.01
2050	12.97	9.31	10.75	7.82

Les émissions de gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O et gaz fluorés) atteindraient 21 Gt CO<sub>2</sub>-e en 2050 soit une augmentation de 1,6% par an sur la période 2010-2050. La figure 1 donne la répartition des émissions de gaz à effet de serre dans chacune des zones et l'évolution globale de ces émissions. La part des pays en développement passerait de 39% à 65%, le poids relatif des pays industrialisés (NAM et OEC) étant divisé par deux environ.



## Le calcul de la contrainte climatique

Le modèle intégré énergie-climat (TIAM) est utilisé pour calculer un budget mondial d'émissions de gaz à effet de serre sur la période 2005-2050. La procédure suivante est utilisée :

- Choix d'une cible climatique de long terme;
- Simulation du système énergétique mondial et obtention d'un profil optimal d'émissions des gaz à effet de serre et calcul du **budget** cumulatif global d'émissions sur la période 2005-2050.

Nous avons choisi une cible de forçage égale à 3,5W/m<sup>2</sup> (cf. le chapitre 1 pour une discussion de cette cible). Les résultats en termes d'émissions jusqu'en 2100 des trois GES modélisés sont montrés au tableau 3, la dernière ligne du tableau indiquant les émissions de GES en CO<sub>2</sub>-e.

Tableau 3 : Émissions des trois gaz et émissions GES pour la cible choisie (GtCO<sub>2</sub>-e)

	2005	2008	2012	2027	2033	2046	<b>2050</b>	2054	2076	2100
CH <sub>4</sub> (Mt)	281	240	247	275	304	324	<b>350</b>	377	379	355
CO <sub>2</sub> (Mt)	6704	6574	6388	4467	5074	4915	<b>4843</b>	4771	4062	3444
N <sub>2</sub> O (Mt)	1386	829	842	839	1112	1163	<b>1209</b>	1256	1331	1337
GHG (Gt CO <sub>2</sub> -eq)	31.7	30.1	29.6	23.2	26.2	26.1	<b>26.5</b>	26.9	24.4	21.6

## Le Jeu simulé

Dans des travaux précurseurs (Haurie 1995, Haurie & Zaccour 1995), un paradigme de jeu non-coopératif a été proposé pour représenter des négociations sur une politique climatique. Il s'agit de la notion d'*équilibre normalisé* introduite par Rosen (1965) pour traiter des jeux où les joueurs sont soumis à une *contrainte couplée* qui lie l'ensemble de leurs stratégies. Dans le cadre de politiques climatiques la contrainte couplée consiste en une borne supérieure qu'il est nécessaire d'imposer sur la somme de toutes les émissions de GES sur la période concernée par les négociations. En effet, il est raisonnable de supposer que l'avancement des connaissances sur la dynamique climatique conduira à un consensus scientifique international sur la nécessité d'une réduction importante des émissions de GES. Les déclarations récentes du Gouvernement français (facteur 4) et de la Commission européenne (seuil de 2°C) sont des illustrations de cette tendance. Les pays peuvent donc s'entendre sur la nécessité d'une réduction globale sans pour autant décider de se comporter de manière coopérative (collusion) dans la mise en place des instruments économiques conduisant à ces réductions d'émissions. Cette analyse a été conduite (Drouet et alii 2008) en calculant un ensemble d'équilibres normalisés pour un jeu impliquant trois grandes régions économiques, UE, reste de l'OCDE, PVD. L'intérêt d'utiliser un paradigme d'équilibre non-coopératif est multiple. Tout d'abord il conduit à des politiques négociées qui sont stables (*self enforcing*) puisque, lorsque la pondération définissant la répartition des charges aura été acceptée par l'ensemble des parties, les politiques de l'équilibre seront les meilleures réponses de chacune des parties aux actions des autres. En second lieu d'autres dimensions liées au secteur de l'énergie peuvent aussi être intégrées. Ainsi les comportements stratégiques des pays exportateurs d'hydrocarbures pourront aussi être représentés selon ce paradigme comme cela a été fait dans l'article cité.

Le jeu simulé dans cette étude est basé sur le calcul d'un équilibre normalisé pour un jeu dynamique soumis à une contrainte couplée portant sur le budget global d'émissions de GES permettant d'éviter une évolution dangereuse du climat (cf. chapitre 2 de ce rapport). On peut montrer qu'une famille de tels équilibres est obtenue en répartissant ce budget total d'émissions entre les différents joueurs (groupes de pays) puis en calculant un équilibre de Nash dans un jeu où les stratégies sont les quotas de chaque groupe de pays et les contraintes de chaque joueur correspondent à la répartition choisie. Les gains des joueurs sont calculés à partir des simulations de GEMINI-E3, l'équilibre est calculé par une méthode d'optimisation par oracles, adaptée à la résolution d'inégalités variationnelles (Drouet et al. 2009).

## Les dotations initiales

La répartition des budgets d'émission à chacune des régions du monde est un élément crucial de la négociation car il détermine en grande partie les impacts sur le bien-être des différents pays. C'est certainement le point le plus sensible de la négociation et comme nous l'ont montré les négociations autour du protocole de Kyoto mais aussi sur les négociations *post-Kyoto*, l'aboutissement d'un accord international sera difficile. Cette difficulté provient d'intérêts divergents entre les différentes zones ainsi que d'une grande diversité de situations du point de vue de leur niveau de développement, de

leur situation par rapport à l'énergie (producteur net ou importateur net - efficacité énergétique, etc.), des efforts déjà accomplis, de leur sensibilité par rapport aux changements climatiques envisagés, etc.

Le découpage retenu dans cette étude a pour but de saisir en partie ces différents éléments qui, à terme, structureront la négociation. La zone EEC décrit ainsi les pays producteurs d'énergie (EEC) qui subiront une perte importante de revenu suite à une éventuelle réduction des consommations d'énergie fossile (cf. chapitre 5) et qui en contrepartie ont souvent demandé des compensations financières (Barnetta et alii 2004). Les zones NAM et OEC décrivent les pays industrialisés en distinguant les pays de l'Amérique du Nord du reste des pays industrialisés représentant grosso modo l'Union Européenne, le Japon et la Corée du Sud. Ce découpage a pour but de séparer des pays qui ont jusqu'à maintenant montré des sensibilités assez différentes à l'égard d'un accord international de lutte contre le changement climatique. L'Union Européenne et, dans une moindre mesure, le Japon font preuve d'un certain leadership en faveur de la lutte contre le changement climatique se traduisant par exemple par la mise en œuvre de la directive européenne sur les quotas d'émission, d'un objectif de réduction des émissions de 50 % en 2050 ou encore de parvenir à un accord permettant de limiter l'augmentation de température à 2°C. Au contraire, l'Amérique du Nord et l'Australie ont défendu des politiques moins volontaristes se traduisant par l'absence de contrainte d'émissions à court terme, trop pénalisantes selon eux, mais cependant aussi par la mise en place de programmes de recherche ambitieux sur les énergies nouvelles ou sur des techniques de décarbonisation. Cette dichotomie doit cependant être relativisée, puisque des propositions américaines récentes tentent de proposer de réduire dans un futur assez proche les émissions de gaz à effet de serre des États-Unis (Metcalf et alii 2008). Enfin la dernière zone représente les pays en développement peu responsables des émissions passées mais qui pour leur développement futur auront besoin d'énergie et qui sont par ailleurs plus sensibles au dérèglement futur du climat. Les règles de répartition de l'effort de réduction des gaz à effet de serre ont fait l'objet d'un nombre important d'étude (Blanchard et alii 2003) cherchant à déterminer des règles acceptables pour tous. En pratique trois critères ont souvent été mis en avant :

- L'égalité, se traduisant par l'allocation des budgets d'émission au prorata de la population de chacune des zones;
- La souveraineté, les budgets sont alors répartis sur la base des émissions constatées (*grandfathering*);
- le consentement à payer, traduisant le fait que plus le pays est riche et moins son quota d'émission doit être important.

Nous avons calculé pour chacun des critères les répartitions obtenues en utilisant comme indicateur d'égalité la population de 2001, de souveraineté les émissions de 2001 et pour le consentement à payer le PIB de l'année 2001<sup>5</sup>. Nous avons finalement testé un ensemble plus large d'allocations en créant des règles hybrides<sup>6</sup>. Nous avons finalement retenu 5 règles d'allocation:

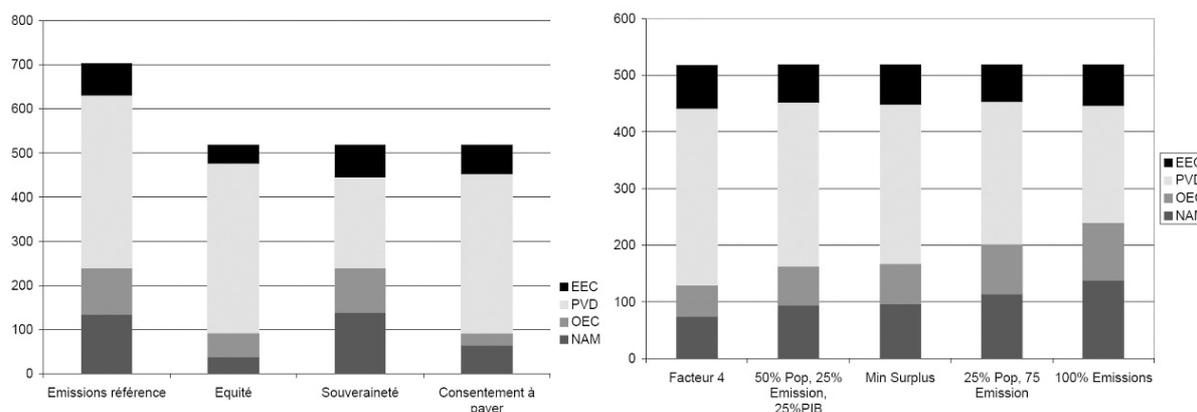
- Une règle accordant un poids de 50% à la population (égalité), de 25% aux émissions (souveraineté) et au PIB (consentement à payer);
- Une règle accordant un poids de 25% à la population et de 65% au PIB;
- Une règle uniquement basée sur le critère de souveraineté;
- Une règle s'inscrivant dans la philosophie du facteur 4 et cherchant à faire porter l'effort principal sur les pays industrialisés, en accordant une allocation généreuse à la zone EEC en dédommagement des pertes de revenus consécutives à la baisse de demande d'énergie;
- Une allocation cherchant à minimiser les pertes de bien-être supporté par chacune des zones géographiques.

<sup>5</sup> En pratique les réductions d'émissions de GES sont réparties au prorata du PIB de l'année 2001.

<sup>6</sup> Il faut noter que pour certaines règles d'allocation accordant un poids important à l'équité, c'est à dire donnant un poids supérieur à 60% au critère d'équité nous n'avons pu obtenir de solution avec l'algorithme employé, rendant nécessaire l'utilisation d'une autre méthode d'optimisation.

La figure 2 présente sur la base de ces règles les allocations obtenues et les compare aux émissions de GES du compte de référence.

Figure 2 : Dotations initiales (à gauche : sur la base de critères standards, à droite : critères finalement retenus et testés en GtCO<sub>2</sub>-eq)



## Les résultats

### Profil d'émission mondiale et prix du CO<sub>2</sub>

Un premier résultat a trait au profil mondial d'émission obtenu avec les différentes règles d'allocation. Le profil est peu sensible à la répartition des allocations entre les régions et donc le prix du permis de CO<sub>2</sub> est peu différent entre les différentes allocations. Il serait égal en 2050 au minimum à 19\$/tCO<sub>2</sub> et au maximum à 23 \$/tCO<sub>2</sub> (cf. le tableau 4).

Figure 3 : Profil d'émission mondiale en fonction des différentes allocations initiales (MtC)

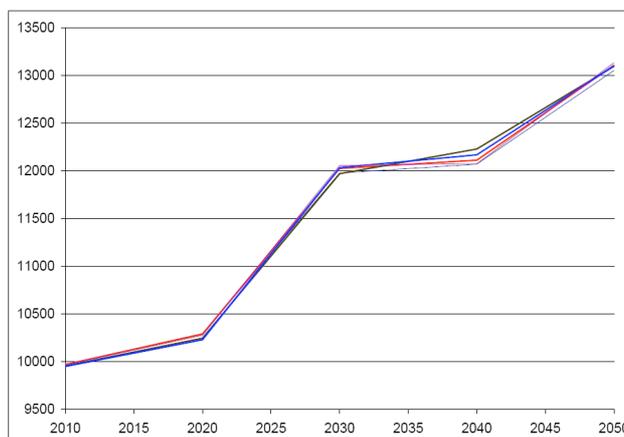


Tableau 4 : Prix du CO<sub>2</sub> en \$/tCO<sub>2</sub> 2001

	2010	2020	2030	2040	2050
Facteur 4	3	10	12	18	20
50% pop, 25% Emission, 25% PIB	3	10	11	17	19
Emissions	4	10	12	16	19
60% Pop, 40% Emissions	4	12	14	21	23
Min Surplus	4	10	11	18	19

## Les affectations temporelles

Le tableau 5 présente les affectations obtenues pour chacune des régions aux différentes périodes. Naturellement celles-ci dépendent des dotations initiales, mais on constate que quelles que soient les dotations, les pays industrialisés (NAM et OEC) et les pays exportateurs de pétrole ont tendance à affecter leur dotation aux premières périodes, au contraire des pays en développement qui reportent leur dotation vers la fin de l'horizon. Il semble bien s'établir une distinction entre ces pays en développement et les autres pays. Une des raisons explicatives pourrait être le poids très important de cette zone dans les dotations initiales, qui représente toujours plus de 40% des dotations mondiales (cf. figure 2) lui faisant jouer en un rôle pivot dans le jeu. De plus, les pays en développement possèdent en général un potentiel initial assez large de réduction d'émissions (dû à leur relative inefficacité énergétique), ce qui leur permet d'effectuer des réductions immédiates, alors que leur forte croissance économique rend de telles réductions plus difficiles en fin d'horizon.

Tableau 5 : Allocations temporelles selon les allocations initiales en MtC-eq

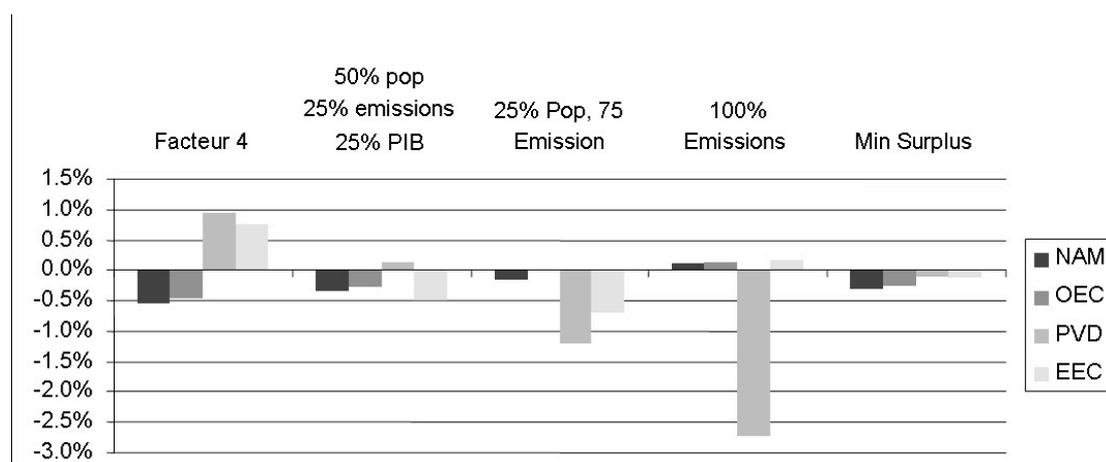
	2005	2020	2030	2040	2050		2005	2020	2030	2040	2050
<i>Facteur 4</i>						<i>50% Pop, 25% Emission, 25% PIB</i>					
NAM	2492	1517	1461	1239	1267	NAM	2492	2008	2042	1833	1842
OEC	2187	1130	1158	858	932	OEC	2187	1425	1476	1195	1252
PVD	4061	5892	7547	8158	8953	PVD	4061	5281	6955	7599	8466
EEC	1067	1752	1808	1812	1897	EEC	1067	1572	1549	1482	1544
<i>Emissions</i>						<i>60% Population 40% emissions</i>					
NAM	2492	3083	3130	3123	3091	NAM	2492	1389	1784	1384	1659
OEC	2187	2162	2335	2232	1947	OEC	2187	1479	1442	1427	1506
PVD	4061	3251	4774	5326	6248	PVD	4061	5904	7238	7673	8410
EEC	1067	1746	1728	1545	1807	EEC	1067	1251	1184	1264	1137
<i>Min Surplus</i>											
NAM	2492	2138	2025	1853	1895						
OEC	2187	1424	1660	1169	1340						
PVD	4061	5076	6724	7496	8254						
EEC	1067	1635	1645	1554	1641						

## Les surplus

Les surplus des différentes zones dépendent bien sûr des dotations. Nous présentons dans la figure 3 les surplus totaux (sur la période 2005-2050, actualisés) de chaque région. Le surplus des pays en développement apparaît très sensible aux allocations testées dans cette étude. Les règles privilégiant les émissions comme critère pénalisent cette région ce qui conduit à un coût important évalué à 2,5% de la consommation de cette zone dans le cas d'une règle basée uniquement sur ce critère. La règle *facteur 4* par essence pénalise les pays industrialisés et favorise au contraire les zones EEC et PVD.

**Elle apparaît cependant acceptable pour les pays industrialisés car le coût n'est pas supérieur à 0.5% de la consommation des ménages, ce qui est supportable.** Enfin la règle conduisant à minimiser les surplus si elle ne pénalise aucune zone ne possède cependant pas de caractère incitatif pour les PVD comme le ferait la règle *facteur 4*. Toutefois, cette règle serait peut-être la plus facilement acceptable car c'est celle qui amène le moins de différence entre les pays.

Figure 3 : Surplus par pays en % de la consommation finale



## Conclusion

Le jeu simulé dans cette partie consistant, sur la base d'une dotation initiale de droit d'émission de GES, à calculer les allocations temporelles des pays dans le cadre d'un jeu non coopératif apporte plusieurs enseignements :

- Tout d'abord le profil d'émission temporelle ne semble pas dépendre des dotations initiales et des règles servant à les construire;
- Il semble donc bien possible de séparer l'objectif de limitation du réchauffement climatique et le partage du fardeau de la réduction, puisque ce dernier n'interfère pas sur la dynamique de l'abattement. Ce principe de séparation a déjà été évoqué dans plusieurs études;
- La construction des règles servant à calculer la répartition de la dotation des droits d'émission apparaît déterminante dans le coût assumé par les régions et donc dans l'acceptabilité d'un objectif commun de réduction;
- La négociation doit donc bien privilégier ce point car c'est lui qui déterminera à terme la construction d'un accord international en vue de limiter le réchauffement de notre climat.

## Bibliographie

1. J. Barnetta, S. Dessaib, and M. Webber. Will *OPEC lose from the Kyoto Protocol* ? Energy Policy, 32 : 2077-2088, 2004.
2. O. Blanchard, P. Criqui, A. Kitous, and L. Viguiier. *Providing Global Public Goods : Managing Globalization, chapter Combining Efficiency With Equity : A Pragmatic Approach*, pages 280-303. Oxford University Press, 2003.
3. Drouet L., A. Haurie, F. Moresino, J.-P. Vial, M. Vielle and L. Viguiier, A Coupled Equilibrium Model of International Climate Policy, *Computational Management Science*, 5(3) pages 119–140, 2008.
4. Drouet L., A. Haurie, J.-P. Vial, M. Vielle, A coupled game solved with the homogeneous version of OBOE to model Post Kyoto international climate policy, *Annals of the International Society of Dynamic Games*, Vol. 11 à paraître 2009.
5. Haurie A. , Environmental Coordination in Dynamic Oligopolistic Games, *Group Decision and Negotiations*, Vol. 4, pp. 39-57, 1995.
6. Haurie A. and G. Zaccour. Differential game models of global environmental management, in Carraro and J. Filar eds. *Game-Theoretic Models of the Environment*, Vol. 3 Annals of the International Society of Dynamic Games, chapter pages 3–23. Birkhäuser, Boston, 1995.

7. Helm, C. International emissions trading with endogenous allowance choices. *Journal of Public Economics*, Vol 87:2737—2747, 2003.
8. Labriet M. and R. Loulou, 2007. How Crucial is Cooperation in Mitigating World Climate? Analysis with World-MARKAL, *Computational Management Science*, to appear 2007.
9. Labriet M., R. Loulou and A. Kanudia, Global Energy and CO2 Emission Scenarios: Analysis with a 15-Region World MARKAL Model, Chapter 8 in A. Haurie and L. Vigier eds. *The Coupling of Climate and Economic Dynamics*, Advances in Global Change Research, Vol.-22, Springer 2005.
10. G.E. Metcalf, S. Paltsev, J. M. Reilly, H.D. Jacoby, and J. Holak. *Analysis of U.S. greenhouse gas tax proposals*. Technical Report 160, MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change, April 2008 2008.
11. Y. Nesterov and J.-P. Vial. Homogeneous analytic center cutting plane methods for convex problems and variational inequalities. *SIAM J. Optim.*, 9(3):707–728, 1999.
12. Nordhaus W.D. and Yang Z., A regional dynamic general-equilibrium model of alternative climate change strategies, *American Economic Review*, 86, 4, 741-765, 1996.
13. J.-B. Rosen, Existence and uniqueness of the equilibrium points for concave n-person games. *Econometrica*, Vol. 33 (3), pp.~520—534, 1965.

## 7. Exemple de simulation de régimes fragmentés (asymétriques ou asynchrones)

À la lumière de ce qui précède, les différentes options qui s'offrent aux nations après Kyoto constituent donc un vaste éventail, qui est examiné (en partie ou en totalité) par les Conférences des Parties à la Convention sur le Changement Climatique, en vue d'atteindre un consensus d'ici la conférence COP-15 de Copenhague en décembre 2009. Dans notre projet, nous avons voulu explorer quelques-unes de ces options, à la fois à titre d'exemples d'accords possibles, et aussi comme des démonstrations de ce que notre méthodologie peut offrir pour faciliter l'examen d'options complexes. Cette complexité provient principalement de l'asymétrie des régimes dans différentes régions du monde et de l'asynchronie qui pourrait bien présider aux accords futurs, comme l'illustrent bien les propositions devant être discutées à Copenhague. Nous regroupons ces deux notions dans le vocable de *régimes fragmentés*.

Dans tous nos scénarios sauf celui de référence, il s'agit de respecter la même cible climatique durant le 21<sup>ème</sup> siècle, soit : le forçage radiatif total dû à l'ensemble des gaz de Kyoto (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, HFCs, PFCs, SF<sub>6</sub>) ne doit jamais dépasser la valeur de 3,75 Watts/m<sup>2</sup> en tout temps. Cette cible garantit que la concentration des GES de Kyoto ne dépassera pas la valeur de 555 ppmv exprimée en CO<sub>2</sub>-e (soit environ 450 ppmv pour CO<sub>2</sub> seul). Cette cible est assez contraignante, quoique moins contraignante que certaines cibles dites sécuritaires mentionnées au chapitre 1.

Nous avons utilisé le modèle TIAM, harmonisé avec GEMINI-E3 comme nous l'avons décrit au chapitre 3, pour simuler les 4 scénarios suivants :

Scénario de référence (REF): aucune cible climatique n'est imposée.

Scénario efficient (EFF): tous les pays s'entendent pour coopérer à l'atteinte de la cible climatique en agissant de façon concertée et optimale dès 2012. Ceci implique qu'un système de permis échangeables général soit instauré dès 2012. Ce scénario ne prétend pas au réalisme mais sert plutôt d'étalon de comparaison pour les autres régimes.

Les 2 autres scénarios sont fragmentés (FRAG1 et FRAG2). On distingue trois groupes de pays :

Groupe 1 : Les pays de l'OCDE plus l'ancienne Union Soviétique

Groupe 2 : Chine et Inde

Groupe 3 : Reste du monde

Dans *FRAG1*, le groupe 1 a l'obligation de réduire ses émissions annuelles moyennes entre 2012 à 2050 au niveau de 75% de ses émissions de 1990. Le groupe 2 a l'obligation de réduire ses émissions annuelles moyennes entre 2030 et 2050 au niveau de 85% de ses émissions de 2030. Le groupe 3 n'a aucune obligation de réduction avant 2050. Les échanges de permis commencent en 2020, et les pays des groupes 2 et 3 peuvent effectuer des réductions volontaires de leurs émissions dès 2020, et les vendre aux pays ayant des obligations de réduction. La coalition est générale après 2050, et coopère de façon optimale par la suite.

Le scénario *FRAG2* est identique au scénario *FRAG1* à l'exception des échanges de permis, qui commencent en 2030 (au lieu de 2020). Ceci implique que les pays des groupes 2 et 3 n'effectuent aucune réduction, même volontaire, avant 2030. Ainsi, les deux scénarios fragmentés, *FRAG1* et *FRAG2*, diffèrent seulement parce que les pays du groupe 1 n'ont pas recours aux achats de permis des autres groupes entre 2020 et 2030.

### Remarques:

Nous avons aussi simulé ces mêmes scénarios mais en utilisant une cible plus contraignante de 3,5 W/m<sup>2</sup> en tout temps. Cette cible se révèle être atteignable uniquement dans le scénario efficient, et irréalisable dans les deux scénarios fragmentés. Ceci est dû au fait que dans les scénarios fragmentés,

les obligations totales de réduction de tous les pays de la planète sont trop modestes pour respecter la contrainte climatique avant 2050, alors qu'après cette date, la coalition globale peut faire un effort accru pour maintenir le forçage radiatif en dessous de  $3,5 \text{ W/m}^2$ . Par contre, les scénarios fragmentés avec une cible de  $3,5 \text{ W/m}^2$  deviennent réalisables si l'on resserre les niveaux moyens d'émissions respectifs des trois groupes comme suit: groupe 1 à 70% au lieu de 75%; groupe 2 à 80% au lieu de 85%; groupe 3 à 95% au lieu de 100%.

De nombreux autres scénarios fragmentés peuvent être imaginés et simulés, ceux retenus pour fins de discussion l'étant à titre de démonstration seulement.

## Résultats pour les 4 scénarios retenus

### Coût total

Dans TIAM, le coût d'un scénario est représenté par la perte actualisée de surplus total, par rapport au surplus du scénario de référence. Le tableau 1 indique cette perte de surplus exprimée en M\$ et aussi en pourcentages du PIB mondial actualisé. La fragmentation du régime entraîne un surplus de coût d'environ 20 à 25% par rapport au scénario efficient, ce qui est loin d'être négligeable.

Tableau 1 : Perte de surplus mondial dans les différents scénarios

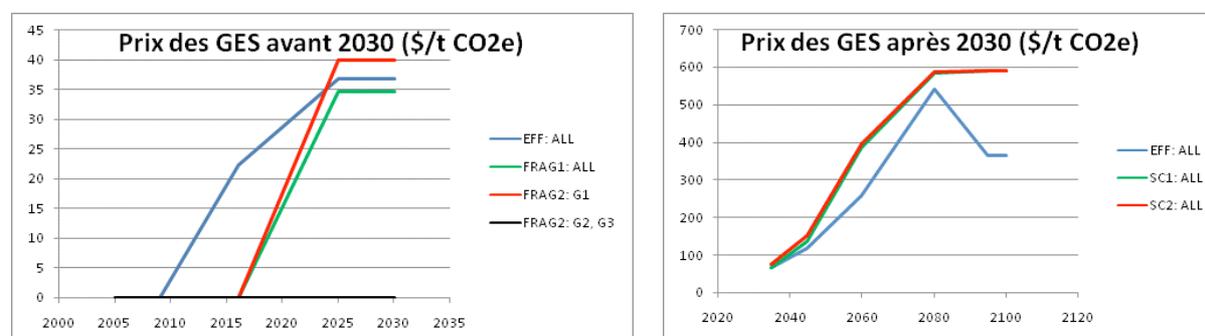
	PERTE DE SURPLUS (M\$)	% du PIB mondial
REF	0	
EFF	11,872,456	0.73%
FRAG1	14,336,125	0.88%
FRAG2	14,787,236	0.90%

### Prix des GES

Une autre mesure de la facilité (ou la difficulté) d'atteindre la cible est l'observation du coût marginal du  $\text{CO}_2$  (qui est égal à son prix dans un marché libre). Les graphiques de la figure 1 montrent ces prix pour les différents scénarios et groupes de pays, avant et après 2030 respectivement.

Après 2030, il n'y a qu'un prix mondial des GES. Avant 2020, le prix n'est pertinent que dans le groupe 1 (il est nul dans les groupes 2 et 3, puisque ces groupes ne font pas de réductions). En 2025, le prix varie de groupe à groupe et aussi selon le scénario.

Entre 2020 et 2030, un phénomène intéressant est observé : le prix dans le scénario *EFF* est supérieur au prix dans le scénario *FRAG1*. Ce résultat contre intuitif est dû au fait que dans le scénario efficient, il est optimal d'effectuer plus de réductions avant 2030, et donc d'atteindre un niveau de prix élevé.



Bien sûr, ceci est compensé par un prix plus bas par la suite. Il faut noter aussi la chute relative du prix des GES en fin d'horizon pour le scénario EFF, qui est dû au fait que la contrainte climatique devient moins restrictive à mesure que le siècle avance, et ce pour deux raisons :

- 1) de nouvelles options technologiques apparaissent ou deviennent moins chères
- 2) la dynamique des cycles de vie des GES est telle qu'il est plus aisé de maintenir le forçage radiatif en deçà de la limite lorsque des réductions importantes ont eu lieu relativement tôt dans le siècle (ce qui est le cas du scénario *EFF*, mais pas des scénarios fragmentés, cf. figure 2).

## Émissions

La figure 2 nous confirme que le scénario *EFF* requiert des émissions globales plus basses en début de siècle (avant 2040) et ensuite plus hautes que celles des scénarios fragmentés. Les deux scénarios fragmentés diffèrent essentiellement par un retard relatif de *FRAG2* à réduire les émissions, ce qui est bien sûr prévisible vu le retard des obligations de réduction dans *FRAG2*.

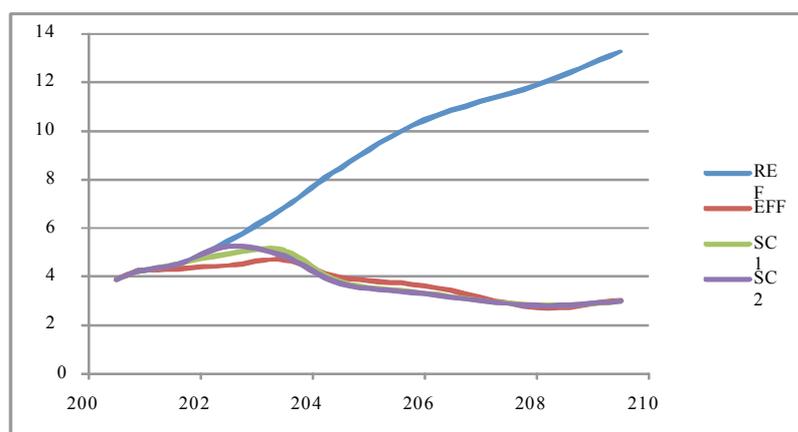


Figure 2. Émissions de GES (GTC-e par an)

## Énergie finale

Nous nous contentons d'examiner la composition des énergies finales jusqu'en 2050. Les 4 graphiques de la figure 3 montrent tout d'abord une importante diminution de l'énergie finale provoquée par la contrainte climatique. Cette diminution est en grande partie due à l'augmentation marquée de la part de marché de l'électricité dans les 3 scénarios contraints, mais aussi à des gains d'efficacité énergétique réels.

La part de l'électricité, qui est de moins de 20% en 2050 dans le scénario *REF*, bondit à des niveaux variant entre 35 et 38% en 2050 dans les 3 autres scénarios, avec un maximum dans *FRAG2*. La part du charbon diminue considérablement mais reste positive à cause des besoins spécifiques de l'industrie de l'acier principalement. La part du gaz varie peu entre les différents scénarios et celle du pétrole diminue de façon marquée, surtout après 2030, grâce à la concurrence des véhicules alternatifs (alcools d'origine cellulosique, véhicules électriques et hybrides). Les autres énergies renouvelables (solaire, géothermie) pénètrent fortement vers 2040-2050.

## La production d'électricité

Les graphiques de la figure 4 confirment tout d'abord l'augmentation nette de la production électrique totale dès l'imposition de la contrainte climatique, puis témoignent d'une augmentation plus progressive à mesure que les marchés deviennent plus fragmentés. La part des centrales à charbon passe progressivement à 0 dans les trois scénarios contraints, les centrales à charbon avec capture du CO<sub>2</sub> et Séquestration (CCS) les remplacent avantageusement, produisant environ 45% de l'électricité mondiale en 2050. Ainsi, cette technologie joue un très grand rôle dans les scénarios à contrainte

climatique. L'électricité d'origine renouvelable (principalement éolien et hydro, avec un peu de solaire thermique) double environ sa part de marché en 2050 par rapport au scénario de référence. Bien que moins visibles sur les graphiques, ces tendances sont accentuées dans les scénarios fragmentés. Au total, le secteur électrique est presque sans émissions de GES en 2050 (et bien sûr par la suite aussi).

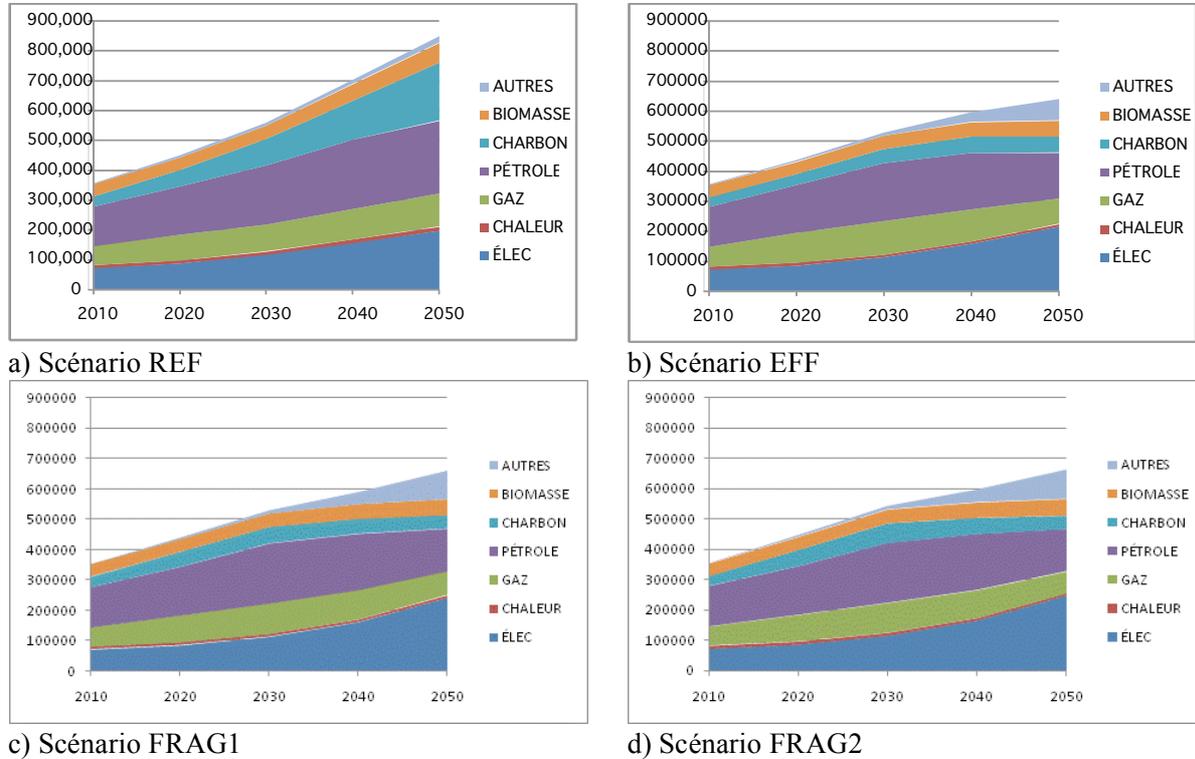


Figure 3. Énergies finales mondiales (PJ/an)

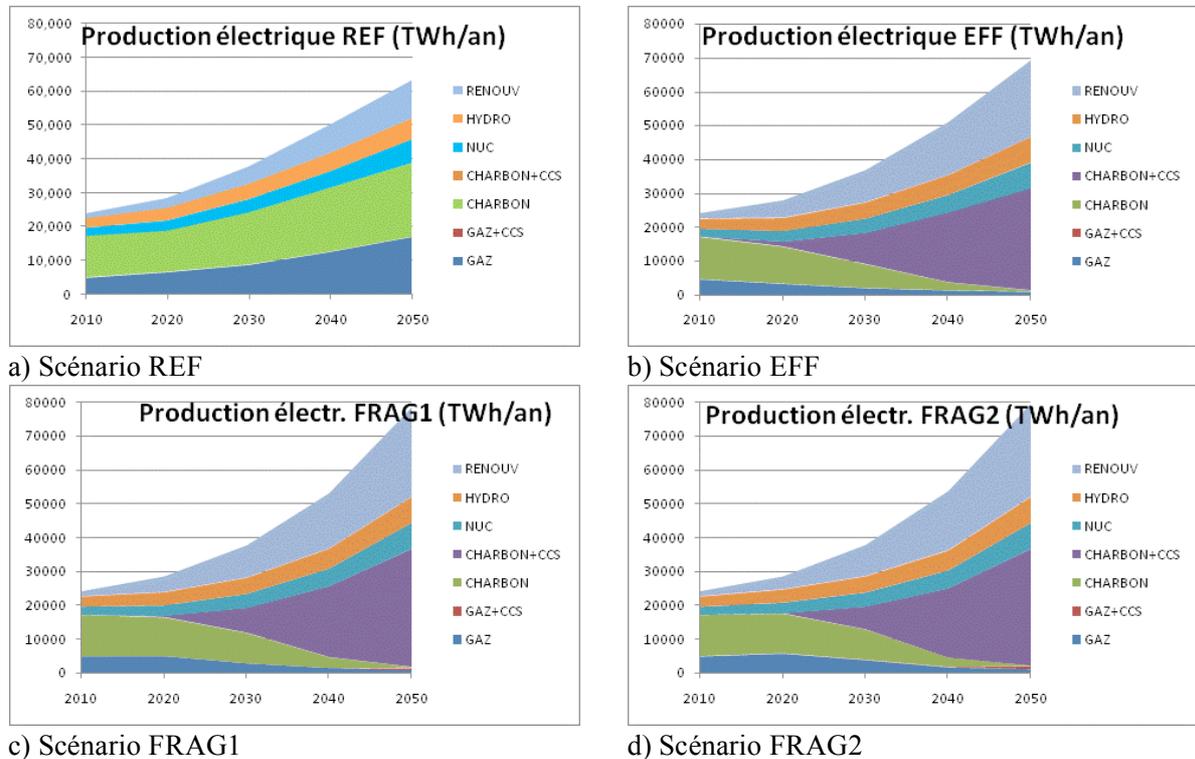


Figure 4. Production mondiale d'électricité (TWh/an)

## Conclusion

Les deux régimes fragmentés analysés présentent des similarités quant aux technologies et aux énergies qui sont adoptées pour atteindre la cible climatique. Tous deux diffèrent cependant de façon appréciable du régime coopératif du scénario *EFF*. Ils montrent par exemple une production d'électricité d'origine renouvelable environ 12% supérieure à celle du scénario *EFF*.

Une bonne mesure globale de l'obstacle présenté par la fragmentation est sans doute le coût global du scénario, qui est environ 20% plus élevé dans *FRAG1* que dans *EFF*, et 23% plus élevé dans *FRAG2* que dans *EFF*. Ces coûts supplémentaires sont donc appréciables.

De plus, comme l'ont montré les simulations complémentaires, la fragmentation a rendu irréalisable l'atteinte d'une cible climatique de  $3,5 \text{ W/m}^2$ , et a nécessité la relaxation de cette cible à  $3,75 \text{ W/m}^2$ . La cible de  $3,5 \text{ W/m}^2$  est cependant atteignable si les obligations des trois groupes de pays sont légèrement resserrées. Ainsi, il serait souhaitable que les différents groupes de pays acceptent des obligations de réduction qui sont compatibles avec la cible climatique retenue. Notre outil permet de tester rapidement la compatibilité des obligations et de la cible climatique, et peut donc servir d'outil d'aide à la négociation.

L'outil dont nous disposons est adapté à la simulation de nombreux types de marchés fragmentés. On peut imaginer d'autres types de fragmentation où des groupes de pays formeraient des marchés d'émissions entièrement séparés, chacun avec sa propre cible de réduction. Cette situation est une généralisation de celle simulée dans nos exemples, où chaque pays passe d'un régime d'émissions non contraintes à un régime d'échange global de permis.

Nous prévoyons dans un futur proche d'étendre nos simulations à de nombreuses variantes de marchés fragmentés.



## 8. Références

### Publications

#### Parues

1. Bernard A. and M. Vielle GEMINI-E3, A General Equilibrium Model of International-National Interactions between Economy, Energy and the Environment, *Computational Management Science*, Volume 5, number 3, May 2008, pp 173-206.
2. Bahn O., A. Haurie and R. Malhamé, A stochastic control model for optimal timing of climate policies, *automatica* Vol. 44, No 6, pp. 1545-1558, June 2008.
3. Drouet L., Haurie A., Moresino F., Vial J.-P., Vielle M. and Viguier L., An oracle based method to compute a coupled equilibrium in a model of international climate policy, *Computational Management Science*, Vol. 5 (1-2) pp. 119-140, 2008.
4. Labriet, M., and R. Loulou, 2007, "How Crucial is Cooperation in Mitigating World Climate? Analysis with World-MARKAL", *Computational Management Science*, Vol. 5, No 1, pp. 67-94
5. Loulou, R., and M. Labriet (2007), "ETSAP-TIAM: The TIMES Integrated Assessment Model -- Part I: Model Structure", *Computational Management Science*, Vol. 5, No 1-2, pp. 7-40.
6. Loulou, R., (2007), "ETSAP-TIAM: The TIMES Integrated Assessment Model --Part II: Mathematical Formulation", *Computational Management*, Vol. 5, No 1-2, pp. 41-66.

#### À paraître

7. Bahn O. and A. Haurie, A Class of Games with Coupled Constraints to Model International GHG Emission Agreements. *International Game Theory Review*, to appear, 2009.

#### Soumises

8. L. Drouet, A. Haurie, J.-P. Vial, M. Vielle, A coupled game solved with the homogeneous version of OBOE to model Post Kyoto international climate policy. Soumis à Annals of the International Society of Dynamic Games.
9. Loulou, R., M. Labriet, A. Haurie, A. Kanudia, 2008, " OPEC Oil Pricing Strategies in a Climate Regime: A Two-Level Optimization Approach in an Integrated Assessment Model", soumis à *Environmental Modeling and Assessment*, Octobre 2008.

### Colloques

1. Haurie A. A coupled game solved with the homogeneous version of OBOE to model Post Kyoto international climate policy. ISDG, Wroclaw, Juin 2008.
2. Haurie A. et al. Modelling technology oriented strategic cooperation on climate change mitigation between the EU, India and China, 2<sup>nd</sup> IAEE Asian Conference, 5-7 November 2008, Perth Australia.
3. Haurie A., O. Bahn R. Malhamé, Stochastic Control and Differential Game models for the Timing of Climate Policies, XIV CLAIO (Latin America Conference on Operations Research), Cartagena; Sept. 9-12, 2008.
4. Haurie A., Equilibrium with coupled constraint for post-Kyoto negotiations : How far are we from Pareto optimality ?, Colloque : « Jeux dynamiques en sciences de la gestion » ; *Workshop Dynamic Games in Management Science* HEC-Montréal, May 2-3 2008-
5. Loulou, R., M. Labriet, A. Kanudia, 2008, 'Achieving Climate Stabilization Targets by efficient v. fragmented coalitions, with ETSAP-TIAM', *EMF-22 Transition Policies WG workshop*, IIASA, Laxenburg, 25-26 septembre 2008

6. Loulou, R., 2008, 'Paradigms of the ETSAP-TIMES Family', *ETSAP annual workshop*, Paris, 2 juillet 2008, Paris
7. Loulou, R., M. Labriet, A. Kanudia, 2008, 'OPEC Oil Strategies in a Climate Regime', *International Energy Workshop*, Paris, 2 juillet 2008
8. Loulou, R., 2008, M. Labriet, A. Kanudia, 2008, 'Climate Targets under uncertainty: Global Analysis with The ETSAP-TIAM Model', *Energy Modeling Forum --EMF-22*, Washington, février 2008
9. Loulou, R., 2008, 'Énergie et Climat: le défi de l'incertitude', *Conférence évaluation environnementale et énergie*, Québec, 8 septembre 2008
10. Loulou, R., A. Kanudia, M. Labriet, U. Remme, 2007, Loulou, R., A. Kanudia, M. Labriet, U. Remme, A. Lehtilä, 2007, 'The TIMES Integrated Assessment Model (TIAM): An Introduction', *ETSAP annual workshop*, 23 novembre 2007, Brasilia
11. Lehtilä, A., R. Loulou, G.C. Tosato, 2007, 'Sensitivity and Tradeoff analysis in TIMES', *ETSAP annual workshop*, 22 novembre 2007, Brasilia
12. Loulou, R., A. Kanudia, M. Labriet, 2007, 'Climate stabilization under uncertainty with TIAM and the new Climate Module', *Energy and environmental modeling*, Montréal, 2 février 2007.
13. Loulou, R., A. Kanudia, M. Labriet, U. Remme, 2007, 'ETSAP-TIAM recalibration and recent improvements', *ETSAP annual workshop*, 19 novembre 2007, Brasilia
14. Loulou, R., M. Labriet, A. Kanudia, G.C. Tosato, A. Haurie, 2007, 'Technological Adoption under Capital Rationing: Analysis via the TIAM-ETSAP Model', *International Energy Workshop*, Stanford, juin 2007
15. Loulou, R., M. Labriet, A. Kanudia, 2007, 'Technological Adoption under Capital Rationing: Analysis via the TIAM-ETSAP Model', *Conférence of the International Association of Energy Economics (Europe)*, juin 2007, Firenze

### Didacticiel accessible sur la toile

Afin de faciliter la diffusion des connaissances acquises grâce à ce projet du GICC, nous avons conçu un didacticiel original et convivial, accessible sur la toile à l'adresse suivante :

<http://dokeos.ordecsys.com>

**username** : gicc

**password**: kanlo

On utilise la plate-forme Dokeos pour présenter différents « cours » qui traitent des différents aspects et résultats du projet. Ce site est déjà opérationnel et sera encore enrichi dans les mois à venir.

### Enseignement-formation

- Loulou, R., 2007, atelier de formation de l'ETSAP, Brasilia, nov 2007
- Labriet, M., 2008, atelier de formation sur les modèles TIMES, en particulier TIAM et ses applications, Madrid, mai 2008

### Expertises

Participation à l'élaboration des nouveaux scénarios du GIEC (deux réunions des experts en modélisation du GIEC, Noordwijkerhout, Janvier 2008 et Washington, Mars 2008)

### Méthodologies

- Un ouvrage reprenant l'ensemble des publications et rapports techniques réalisés en totalité ou en partie grâce à cette subvention de recherche est disponible sur le site internet d'ORDECSYS et distribué, sur demande sous la forme d'un CD-Rom.

- Les modèles TIAM et GEMINI-E3 font officiellement partie du groupe de modèles constituant le Consortium de modèles d'évaluation intégrée (IAMC - Integrated Assessment Modeling Consortium), piloté par le Stanford Energy Modeling Forum et l'IIASA. Ce groupe a pour mission de définir des scénarios et de fournir des simulations et analyses pour alimenter le prochain Rapport d'évaluation du GIEC (Fifth Assessment Report - AR5).

## Autres

VEDA\_FE : Une nouvelle version de cette interface informatique du modèle TIMES (dont TIAM est une des incarnations) a été produite en 2008, en grande partie pour répondre aux besoins de simulation des marchés fragmentés d'émission faisant partie du projet GICC. Cette nouvelle version est disponible à tous les utilisateurs de la plateforme TIMES. VEDA\_FE a été utilisée de façon intensive dans le projet, y comprise pour effectuer le couplage TIAM-GEMINI. Le développeur de VEDA\_FE est la compagnie KANORS, dont le président est aussi membre de KANLO, et qui collabore avec KANLO dans la plupart des projets de cette dernière.