

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

SYNTHÈSE

Convention de recherche 0000328

PROGRAMME GICC
GESTION ET IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE



Laurent Drouet
Alain Haurie¹
Maryse Labriet
Richard Loulou²
Jean-Philippe Vial
Marc Vielle

30 novembre 2008

¹ Responsable scientifique

² 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 négociations 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/m² ou à 3.75 W/m². Les modèles mis en œuvre, les techniques de résolution des solutions des jeux non coopératifs, les scénarios analysés, correspondent à l'ensemble 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/m² ou à 3.75 W/m². 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.

1. Contexte général

Il est maintenant établi que les émissions de gaz à effet de serre (GES) sont la cause d'un changement climatique, qui se manifeste déjà, et qui ira en s'accroissant au cours des décennies futures, même si des actions de remédiation sont entreprises. Les travaux du GIEC (Groupe inter-gouvernemental sur les études climatiques) publiés dans son quatrième rapport d'évaluation (GIEC, 2007) résument l'état des connaissances sur les changements climatiques observés, sur les changements futurs probables, sur les impacts prévus de ces changements sur l'environnement et sur les sociétés, et enfin sur les actions à mener pour y faire face. Ces actions combinent adaptation au changement climatique et atténuation des causes de ce changement, c'est-à-dire réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Le Protocole de Kyoto, entré en vigueur en 2005, impose des cibles de réduction des gaz à effet de serre aux pays industrialisés qui l'ont ratifié. Ces cibles, relativement modestes, concernent la période 2008-2012, et les négociations ont déjà commencé pour définir un accord « post-2012 », dont la proposition est attendue lors de la Conférence des Parties à la Convention-Cadre des Nations Unies sur le Changement climatique, qui se tiendra en décembre 2009.

Dans un tel contexte, notre projet s'intéresse à un certain nombre de questions directement reliées à la problématique post-2012 brièvement présentée ci-dessus, ainsi qu'aux méthodologies pertinentes à leur analyse.

2. Objectifs généraux

Les objectifs de ce projet sont de deux types : d'une part, orientés vers la mise au point de nouvelles méthodes, d'autre part proposant des simulations et analyses de scénarios possibles de réduction des émissions de GES.

Objectifs méthodologiques

Partant des modèles existants GEMINI-E3 (modèle économique d'équilibre général) et TIAM (modèle technico-économique d'équilibre partiel), nous développons une méthode systématique d'harmonisation et de couplage de ces deux modèles, de façon à les utiliser de façon coordonnée pour l'analyse cohérente des résultats de leurs simulations.

Une méthode de représentation des choix de quotas par le cartel de l'OPEP sur la scène pétrolière mondiale : Cette approche est apparentée à la construction d'un jeu économique à deux niveaux, avec un meneur (l'OPEP) et des suiveurs (autres producteurs et consommateurs de pétrole). Le meneur prend ses décisions de quotas pétroliers en tenant compte de la réaction des suiveurs sur l'ensemble de l'horizon de long terme (2010-2100).

Une méthode de détermination des actions de réduction des GES par diverses coalitions de pays : Cette approche est plus réaliste que l'hypothèse de coopération complète entre tous les pays pour la réduction des émissions. Elle implique soit des actions qui ne sont pas coordonnées au niveau mondial (coalitions fragmentées) soit des actions coordonnées mais différenciées dans le temps, certains pays pouvant rejoindre la coalition globale à différentes dates futures.

Une approche algorithmique pour déterminer, à partir d'un budget d'émissions pour chaque région, de l'affectation temporelle de ce budget : chaque groupe de pays demeure libre de choisir ses quotas et ses émissions à chaque période tout en respectant son budget total entre 2010 et 2050.

Simulations et analyses

Scénario de référence : ce scénario ne suppose aucune action nouvelle pour atténuer les GES . Il sert de point de référence auquel comparer les scénarios d'action. Ce scénario est simulé par les modèles TIAM et GEMINI harmonisés ou couplés.

Analyse de la situation de coopération complète des régions pour l'atteinte d'un objectif commun : ce scénario suppose qu'un accord est entériné dès 2012 et engage toute la planète dans des actions coordonnées pour atteindre une cible climatique de façon efficiente. Diverses simulations préliminaires par le modèle TIAM harmonisé avec GEMINI servent à explorer des cibles climatiques possibles.

Scénarios de coopération imparfaite (marchés fragmentés): chacun de ces scénarios introduit des obstacles à une coopération immédiate et complète. Une cible climatique est toujours présente mais son atteinte est rendue plus ardue par des retards à former une coalition globale, et/ou par l'absence de marché de permis d'émissions, du moins dans les premières décennies du siècle. Nous utilisons le vocable général « marché fragmenté » pour désigner de telles situations.

Simulation de diverses allocations de permis aux différentes régions du monde et effet sur le « surplus accumulé » de ces régions: dans ces scénarios, les pays ont une cible commune et reçoivent une allocation de permis sur une durée de 50 ans (budget d'émissions). Cependant, chaque région reste responsable des dates auxquelles effectuer ses réductions d'émissions (tout en respectant son budget). La perte ou le gain de surplus de chaque région dépend à la fois de son budget et du profil d'émissions choisi.

3. Méthodologie

La méthodologie centrale du projet repose sur les deux modèles GEMINI-E3 et TIAM, dont les auteurs sont membres du projet. Les deux modèles ont été revus et enrichis pour les besoins particuliers du projet, et un important travail d'harmonisation et de couplage des deux modèles a été effectué pour les utiliser de manière coordonnée.

GEMINI-E3 est un modèle d'équilibre calculable de l'économie mondiale, dynamique et récursif, à plusieurs secteurs et plusieurs pays/régions. Il a été spécifiquement conçu dès le début pour produire les éléments macro-économiques pertinents pour l'évaluation des politiques énergétiques et environnementales, en particulier celles qui sont liées au changement climatique. Sa création remonte à 1992, et a fait l'objet depuis de plus d'une trentaine d'utilisations. GEMINI-E3 s'appuie notamment sur le concept de 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. GEMINI-E3 représente l'économie globale en décrivant l'ensemble des secteurs de l'économie mondiale à travers 28 régions ; il utilise une nomenclature en 18 secteurs/produits. Pour chacun des

secteurs le modèle 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. Il inclut donc la description de tous les intrants liés à la production, la demande des ménages, et l'ensemble des échanges internationaux de biens et services, et les émissions de gaz à effet de serre (CO_2 lié à la combustion d'énergie fossile et autres gaz à effet de serre compris dans le « panier Kyoto » CH_4 , N_2O , gaz fluorés). 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 de l'EPA.

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 mondial divisé en 15 régions et pays reliées par le commerce de toutes les formes énergétiques. TIAM a été développé par des membres de ce projet GICC sous le parrainage de l'ETSAP (Energy Technology Systems Analysis Programme), elle-même sous l'égide de l'Agence internationale de l'énergie. Le modèle TIAM intègre l'ensemble du système énergétique : ressources primaires, conversion, transport, distribution, et usages finals. Chaque sous-secteur est décrit au moyen de nombreuses technologies existantes et futures, décrites de façon explicite et très détaillée, dont les intrants et les extrants sont des formes énergétiques très désagrégées. Ce système énergies-technologies œuvre de façon cohérente pour la satisfaction de plus de 60 demandes économiques dans tous les secteurs d'utilisation. Ces demandes sont elles-mêmes élastiques à leur propre prix, assurant donc un lien direct du système énergétique avec l'activité industrielle et des ménages. TIAM calcule un équilibre dynamique inter-temporel sur les marchés énergétiques, sur un horizon de long terme (jusqu'en 2100) divisé en périodes de longueurs variables choisies par l'utilisateur. 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. Les émissions de gaz à effet de serre (CO_2 , CH_4 et N_2O) d'origine énergétique, industrielle, agricole, et des sols sont représentées au niveau de chaque technologie; la contribution au changement climatique des autres gaz à effet de serre (non explicitement modélisés) est comptabilisée directement par leur forçage radiatif. TIAM intègre aussi un module climatique qui, partant des émissions de gaz à effet de serre du modèle, calcule leurs concentrations atmosphériques en simulant leurs cycles de vie, puis le forçage radiatif total résultant de ces gaz et des autres effets de forçage non explicitement modélisés dans TIAM, et enfin, 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.

Harmonisation et couplage des deux modèles : Dans l'approche harmonisée, TIAM est piloté par un vecteur de demandes de services énergétiques qui sont directement dérivées de GEMINI-E3, assurant ainsi l'harmonisation des hypothèses socio-économiques des deux modèles. Quant à GEMINI-E3, il est alimenté par les prix de l'énergie tel que calculé par TIAM. Dans l'approche couplée, nous avons construit et implanté une méthode de couplage des deux modèles dans laquelle certains résultats de TIAM sont injectés dans GEMINI pour mettre à jour les prix des énergies ainsi que les mix d'intrants énergétiques de GEMINI. Ce couplage requiert l'application itérative de ces deux opérations, et la convergence observée est excellente. Le couplage a nécessité des modifications de certaines des fonctions de production de GEMINI-E3. La réalisation du couplage est un pas important vers l'utilisation de ces deux modèles faisant appel aux qualités particulières et complémentaires des deux outils.

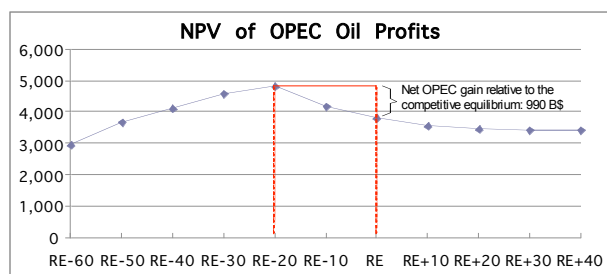
Mise en oeuvre du calcul d'équilibres normalisés : Le calcul de solutions d'équilibres normalisés a été effectué en mettant en oeuvre une méthode de résolution d'inégalités variationnelles basée sur l'algorithme ACCPM homogène. Cette méthode permet d'utiliser un "oracle" pour fournir une évaluation

des gains des joueurs (dans notre cas la variation de surplus par rapport à la situation de référence) et de la sensibilité de ces gains aux actions des joueurs (le pseudo-gradient). L'oracle utilisé est GEMINI-E3. La méthode a des propriétés de convergence théorique intéressante et, en pratique, nous avons pu obtenir des solutions d'équilibre pour un ensemble de jeux représentant un regroupement des nations en quatre groupes, se partageant un même budget global d'émissions.

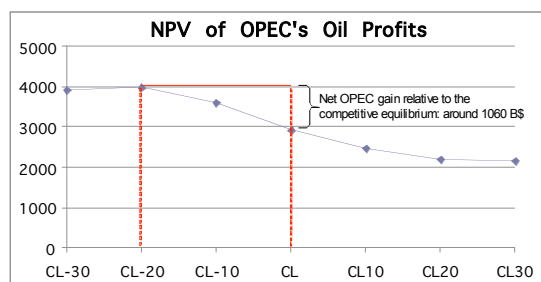
4. Résultats obtenus

Influence des stratégies de l'OPEP sur l'atteinte d'une cible climatique globale

Cette étude visait à analyser les relations possibles entre les stratégies pétrolières de l'OPEP et les politiques climatiques globales. Les décisions de l'OPEP sur ses quotas de production de pétrole ont été évaluées dans deux scénarios contrastés, l'un de Référence et l'autre de poursuite d'un objectif Climatique traduit par une cible de forçage radiatif de 3,5 W/m² à ne pas dépasser. Pour chaque scénario, nous avons simulé à l'aide de TIAM une série de niveaux de quotas de production possibles, et pour chaque niveau, nous avons déterminé le profit net de l'OPEP. La figure ci-dessous montre ces profits pour les deux scénarios. Dans les deux cas, il s'avère que l'OPEP a intérêt à fixer ses quotas de production à 80% de la quantité de pétrole en l'absence de quotas (la situation sans quotas correspond au marché concurrentiel). Nous observons aussi que le profit optimal de l'OPEP, proche de 4000 G\$ dans le scénario climat, est plus faible de 24% du profit obtenu dans le scénario de référence, pouvant signifier la réticence de l'OPEP face à tout accord international sur les changements climatiques.



Cas de référence



Cas avec contrainte climatique

Un deuxième résultat recherché consistait en l'évaluation de la perte de bien-être global (mesurée par la diminution du surplus total actualisé) provoquée par la politique de quotas optimaux de l'OPEP. Cette perte actualisée s'élève à environ 1700 G\$ dans le scénario de référence et à 1600 G\$ dans le scénario climatique. Ces pertes ne sont pas négligeables, mais restent cependant en deçà de 0,1% du PIB mondial actualisé dans les deux scénarios. Autrement dit, l'OPEP n'a pas un pouvoir d'influence majeur sur le bien-être global.

Quant à l'évaluation de l'impact des quotas optimaux sur la politique climatique, la comparaison des coûts de la politique climatique avec et sans quotas est plutôt rassurante puisqu'il s'avère que ce coût est légèrement plus *faible* (d'environ 100 G\$) lorsque l'OPEP applique une politique de quotas optimaux que lorsqu'elle ne le fait pas. La différence est minime, mais elle démontre que l'OPEP n'a pas d'influence notable sur les politiques climatiques globales. Autrement dit, 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, par l'intermédiaire de l'augmentation du pétrole engendrée par les quotas, même dans le scénario climatique.

Répartition des budgets d'émission et impact sur le bien-être des différentes régions

Nous avons utilisé un modèle GEMINI-E3 agrégé détaillant quatre zones géographiques, respectivement l'Amérique du Nord et l'Océanie (*NAM*), les autres pays de l'OCDE (*OECD*), les principaux pays exportateurs de pétrole (*EEC*) et les pays en développement (*PVD*).

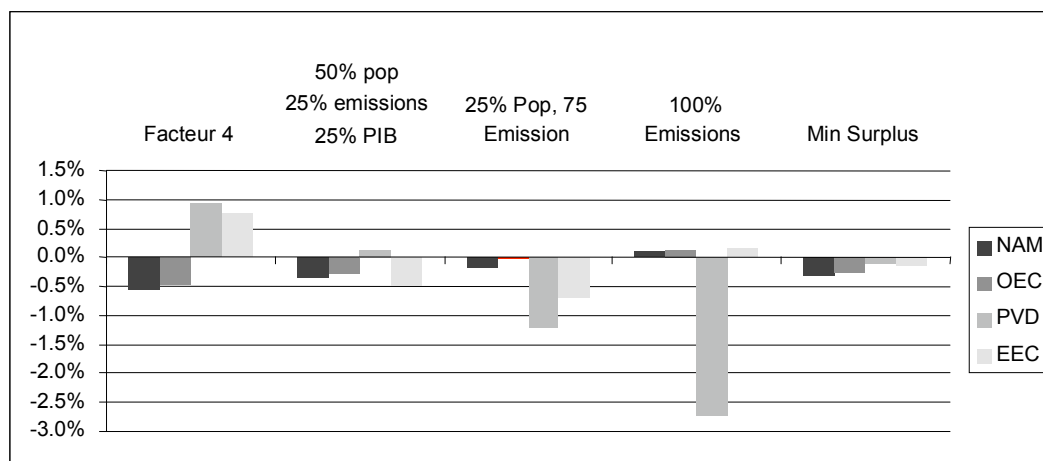
Les règles de répartition de l'effort de réduction des gaz à effet de serre ont fait l'objet d'un nombre important d'études cherchant à déterminer des règles acceptables pour tous. En pratique trois critères ont souvent été mis de l'avant :

- 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;
- le consentement à payer traduisant le fait que les pays les plus riches doivent réduire plus leurs émissions, et donc se voir allouer des quotas d'émissions restreints.

Nous avons calculé, pour chacun des critères, les répartitions obtenues en utilisant comme indicateur d'égalité la population de 2001, comme indicateur de souveraineté les émissions de 2001 et pour le consentement à payer, le PIB de l'année 2001. Nous avons finalement retenu 5 allocations :

- Une allocation accordant un poids de 50% à la population (égalité), de 25% aux émissions (souveraineté) et au PIB (consentement à payer);
- Une allocation accordant un poids de 25% à la population et de 65% au PIB;
- Une allocation uniquement basée sur le critère de souveraineté;
- Une allocation s'inscrivant dans la philosophie du facteur 4 et cherchant à faire porter l'effort principal sur les pays industrialisés, et 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 supportées par chacune des zones géographiques.

La figure ci-dessous résume les gains à l'équilibre des différents joueurs selon les cinq règles d'allocation du budget carbone.



Le surplus des pays en développement apparaît très sensible aux allocations testées dans cette étude. Les règles privilégiant les émissions comme critère pénalisent évidemment cette région, dont les émissions actuelles ne sont pas très élevées, 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 la règle *facteur 4*. Toutefois, cette règle serait peut-être la meilleure car c'est celle qui amène le moins de différence entre les pays.

Analyse préliminaire de scénarios de coopération parfaite et fragmentée pour l'atteinte d'une cibles climatique globale

Les différentes options qui s'offrent aux pays après Kyoto constituent un vaste éventail, qui sera examiné (en partie ou en totalité) lors des prochaines Conférences des Parties, telles que celle de décembre 2008 en Pologne, dans l'espoir d'atteindre un consensus lors de la COP de 2009 à Copenhague. 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, par exemple lorsque les régimes de réduction des émissions sont asymétriques ou asynchrones. Nous qualifions ces régimes de *fragmentés*.

Dans nos scénarios sauf celui de référence, une cible climatique globale est respectée, sous la forme d'un forçage radiatif total ne dépassant jamais une valeur limite. Nous avons essayé deux cibles: la première, de 3,5 W/m² et correspondant à une concentration de GES de 530 ppmv (CO₂-e), s'est révélée inatteignable dans les scénarios fragmentés. Ainsi, la seconde cible de 3,75 W/m² a finalement été utilisée, correspondant à une concentration de 555 ppmv (CO₂-e) respectivement (exprimées en CO₂-e). Ces cibles sont assez contraignantes, mais pas autant que certaines cibles dites sécuritaires mentionnées dans la littérature. Nous avons utilisé le modèle TIAM, harmonisé avec GEMINI-E3, 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. 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

FRAG1: Le groupe 1 a l'obligation de maintenir ses émissions annuelles moyennes entre 2012 et 2050 au niveau de 75% de ses émissions de 1990. Le groupe 2 a l'obligation de maintenir 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.

FRAG2: Ce scénario 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.

Résultats:

La cible de 3,5 W/m² s'est révélée inatteignable car les obligations des différents groupes avant 2050 sont insuffisantes pour l'atteindre. Cette cible devient possible si les obligations des groupes sont légèrement renforcées dans les trois groupes, de façon à atteindre 70%, 80% et 95% respectivement. Ce résultat est intéressant car il dessine les contours d'accords futurs qui pourraient être efficaces et réalistes. Les deux régimes fragmentés analysés pour la cible de 3,75 W/m² 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, et une utilisation accrue des énergies renouvelables dans le secteur des bâtiments.

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.

Les scénarios simulés dans ce projet sont des exemples, de nombreuses autres possibilités de scénarios fragmentés pouvant être imaginés. Dans tous les cas, il s'agit de trouver un compromis acceptable entre le réalisme des obligations de réductions des différents groupes de pays et l'efficacité ainsi que le coût global de la stratégie suivie.

L'outil dont nous disposons permet de tester rapidement la compatibilité des obligations proposées et de la cible climatique visée, ainsi que de calculer le coût global de chaque proposition. Il peut donc servir d'outil d'aide à la négociation. Il est en outre 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.

5. Implications pratiques et recommandations

Implications pratiques

L'analyse des stratégies de l'OPEP permet de conclure à l'influence limitée du prix du pétrole sur les politiques climatiques. Cette importante conclusion confirme l'intuition voulant que dans une situation demandant une réduction de la consommation de produits pétroliers, le pouvoir de marché du cartel des producteurs devrait se trouver diminué. L'impact du pouvoir de marché de l'OPEP est donc moindre dans un scénario climatique que dans un scénario de référence. Dans les deux scénarios, la capacité de l'OPEP à faire augmenter les prix du pétrole (et donc ses profits) par une politique de quotas mesurés est bien réelle, mais elle n'a pas de conséquences dramatiques pour le reste de la planète, se traduisant essentiellement par un léger avancement de l'adoption de carburants non fossiles pour les véhicules, et *in fine*, par un surcoût global n'excédant pas quelques euros par ans pour chaque habitant de la planète.

Des méthodes de répartition du budget d'émission entre les régions couvrant un large spectre ont été simulées et brièvement analysées dans ce projet. Il en ressort que la méthode finalement choisie a une grande influence sur les bien-être respectifs des régions. Bien sûr, le projet ne permet pas de se prononcer sur une méthode finale puisque ce choix doit faire l'objet de négociations serrées, en raison même de l'importance de l'enjeu. Nos travaux font cependant ressortir que même pour une répartition favorisant les pays en développement, l'impact sur le bien-être des pays développés pourrait ne pas être très négatif. Ce résultat devra être validé, et un ensemble cohérent de modèles comme celui développé dans ce projet pourrait servir d'aide à la négociation.

L'asymétrie et l'asynchronisme des marchés d'émission peut être un obstacle significatif à l'atteinte efficiente d'une cible climatique précise. Dans nos simulations, nous avons constaté que des obligations de réductions trop timides durant la première moitié du siècle ne permettent pas d'atteindre la cible de 3,5 W/m². Cette cible pourrait être atteinte si les obligations par les différentes régions étaient légèrement renforcées. Pour illustration, nous avons simulé ces obligations fragmentées dans le cas d'une cible plus facile de 3,75 W/m², qui est réalisable. Ici encore, ces scénarios ne sont donnés qu'à titre d'exemples, et l'outil peut être utilisé pour des situations de marchés fragmentés plus complexes, telles qu'elles pourraient émerger des négociations de la conférence des parties.

Recommandations et limites de l'étude

Les modèles coordonnés TIAM et GEMINI-E3 sont à disposition pour effectuer des analyses et des évaluations de politiques climatiques globales. Les illustrations que nous avons faites au cours de ces deux années de travail montrent l'éclairage nouveau que l'utilisation de ces modèles peut apporter au débat sur le partage du fardeau des politiques climatiques entre différents groupes de pays. L'utilisation de concepts d'équilibres dans des jeux non-coopératifs, plutôt que de solutions efficaces au sens de

Pareto, fournit une évaluation qui prend en compte la nécessité de considérer des accords internationaux qui soient stables. Nous recommandons donc aux parties impliquées dans les négociations devant avoir lieu à COP-15 Copenhague dans un an de s'appuyer sur des simulations effectuées à l'aide de ces modèles coordonnés pour évaluer les types d'accord pouvant être considérés comme réalisables lors de cette échéance.

Les limites de l'étude sont principalement dans la faible prise en compte de l'incertitude, tant sur le plan de l'évolution du climat que sur celui de la prospective économique et technologique. Nous avons abordé cette problématique dans des études de caractère qualitatif, utilisant les outils de la commande optimale et des jeux différentiels stochastiques, ainsi que dans une formulation du jeu de négociation, résolu par une méthode d'oracle, en incluant une incertitude sur la sensibilité du climat qui serait résolue d'ici 2025. Cependant il ne s'agit là que d'éléments préliminaires à une prise en compte de l'incertitude dans des modèles aussi vastes que TIAM et GEMINI-E3. Notons qu'un projet allant dans ce sens a été soumis en réponse au nouvel appel du GICC.

Réalisations et valorisation

Partenariats

- Energy Technology Systems Analysis Programme (ETSAP) : ETSAP est un important acteur sur la scène internationale depuis plus de 25 années, dans le domaine de la modélisation et l'analyse technico-économique. KANLO collabore avec ETSAP depuis de nombreuses années, et a récemment renforcé ses liens avec ETSAP, notamment pour le développement et l'amélioration du modèle ETSAP-TIAM³. KANLO est l'auteur principal de TIAM, et a déjà reçu de l'aide financière de l'ETSAP dans ses travaux méthodologiques, notamment pour le module climatique et pour la mise à jour des données de TIAM en 2007-2008. KANLO agit également au nom de l'ETSAP auprès du Stanford Energy Forum (EMF) et notamment dans le consortium des modèles intégrés (IAMC) récemment créé par EMF, et dont TIAM fait partie.
- POLITECNICO DI TORINO (Turin, Italie) : Nous avons développé un partenariat fructueux avec l'équipe du professeur E. Lavagno, au sein de plusieurs projets de la Commission Européenne, comme NEEDS et REACCESS. Dans ces projets, les expertises de nos deux équipes sont complémentaires, et nous comptons continuer ces collaborations dans le nouveau projet européen REALISEGRID qui vient de démarrer.
- UNIVERSITÄT STUTTGART (Allemagne). L'équipe de Markus Blesl, sous la direction du Prof A. Voss, a collaboré à la revue et l'amélioration de la base de données de TIAM, sous la direction de Richard Loulou. Nous entretenons des liens suivis avec cette équipe, notamment dans les projets REACCESS et PLANETS, tous deux issus du Septième Programme-Cadre de la Commission européenne.
- ECN (Amsterdam, Pays-Bas) : ORDECSYS et KANLO collaborent avec l'équipe de Bob Vanderzwaam (ECN) dans le projet PLANETS (7^{ème} Programme Cadre de la CE).
- EPFL (Lausanne, Suisse) : ORDECSYS et KANLO collaborent au projet EU-FP6 TOCSIN, dirigé par le Prof. Ph. Thalmann (REME-EPFL) qui porte sur la modélisation de la coopération en R&D entre l'Europe, la Chine et l'Inde en vue de réduire les émissions de GES après 2012.

Publications

Parues

³ Dans ce rapport, les termes « ETSAP-TIAM » et « TIAM » sont utilisés de manière équivalente.

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 Viguiier 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, 2nd 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 StabilizationTargets 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 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 Capital Rationing: Analysis via the TIAM-ETSAP Model', *Conference 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.ordecys.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.