POLITIQUE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET GEOSTRATEGIE DES MARCHES ENERGETIQUES A LONG TERME

Un projet de recherche soutenu par le programme GICC

Rapport final soumis au GICC

Alain Bernard[1], Patrick Criqui[2], Alain Haurie[3], Pierre Noël[4] (responsable scientifique), Marc Vielle[5], Laurent Viguier[6]

Novembre 2006

[1] Ingénieur général des Ponts, Ministère de l'Equipement.

[2] Responsable du Département Energie et Politiques de l'Environnement (Lepii-EPE), Université Pierre-Mendès-France Grenoble II.

[3] Professeur (hon.), HEC, Université de Genève.

[4] Chercheur au Electricity Policy Research Group (EPRG), University of Cambridge (Royaume-Uni) ; anciennement responsable du programme Energie et Relations Internationales à l'Institut Français des Relations Internationales (IFRI).

[5] CEA-LERNA, Université des Sciences Sociales, Toulouse.

[6] REME, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse, et Joint Center on the Science and Policy of Global Change, Massachussetts Institute of Technology, Cambridge, MA, Etats-Unis.

INTRODUCTION GENERALE

1. Rappel des objectifs du projet et des méthodes mises en œuvre

Ce projet vise à étudier, dans une optique prospective, l'interaction entre la mise en œuvre de politiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) et la dynamique des marchés énergétiques mondiaux, en particulier le marché pétrolier. L'objectif principal est d'explorer l'impact des politiques climatiques sur les grands pays exportateurs de pétrole et les stratégies que ces acteurs pourraient mettre en œuvre, sur les marchés de l'énergie comme dans la négociation climat, pour défendre leurs intérêts dans le contexte d'une contrainte carbone croissante.

Trois « chantiers de recherche » avaient été identifiés, mobilisant des méthodologies diverses :

1. Construction, à l'aide du modèle des marchés énergétiques mondiaux POLES, de scénarios intégrant explicitement les interactions entre marché pétrolier et politiques climatiques ;
2. Modélisation, à l'aide du modèle d'équilibre général calculable GEMINI-E3, des impacts macroéconomiques des politiques climatiques, notamment sur les pays exportateurs de pétrole ;
3. Modélisation de jeux dynamiques représentant les comportements stratégiques des pays exportateurs dans le cadre de la négociation climatique « post-Kyoto » et sur le marché du pétrole.

Ce rapport présente les travaux effectués et les résultats obtenus. Le point 3 de cette Introduction générale développe une synthèse des ces travaux et résultats.

2. Plan du rapport

Le corps du rapport est constitué de deux documents distincts :

- « Stratégies pétrolières et politiques climatiques : les pays producteurs de pétrole du Moyen-Orient face à la contrainte carbone ». On présente dans ce document les travaux et résultats du chantier de recherche n°1.
- « Cadre d'analyse ludique de la négociation post-Kyoto ». Ce document présente les travaux et résultats des chantiers de recherche n°2 et n°3.

En annexe figurent les documents suivant :

- « Annexe 1. Description abrégée du modèle POLES ».

- « Annexe 2. Publications ». Détaille la liste des articles publiés ou à paraître, rédigés dans le cadre de ce projet de recherche.
- « Annexe 3. Communications à des colloques et séminaires ». Présente les communications et participations à des séminaires de recherche effectuées par les chercheurs ayant contribué au projet.

3. Synthèse des travaux réalisés et résultats obtenus

Nous reprenons certaines des question centrales posées dans au début de ce projet de recherche et développons brièvement les réponses que nous leur avons apportées.

Question 1 :Compte tenu de la forme probable de la prochaine étape des négociations sur le climat comment peut-on représenter les partages possibles de l'effort de réduction des émissions de GES en vue d'atteindre une stabilisation de l'augmentation de température moyenne à moins de 2^{o}C. ?

La prochaine étape de négociations sur le climat ne portera pas nécessairement sur l'établissement d'un seul "régime" global mais plutôt sur des accords à "géométrie variable" impliquant un petit nombre de pays ou de groupes de pays jouant un rôle clé. Il n'est pas assuré non plus que ces négociations se dérouleront au sein de la structure IPCC/Kyoto. Ces négociations devront cependant porter sur des engagements de réduction des émissions de GES et les types d'accord pourront être très variables. Les engagements pourront prendre les formes suivantes:

- Objectifs concernant les niveaux d'émissions ;
- Mise en place d'instruments économiques harmonisés ;
- Initiatives technologiques ;
- Initiatives financières.

Les réductions d'émissions devront être progressives en partant de la situation actuelle, définie par les accords de Kyoto. Cependant ces réductions d'émissions devront être guidées par des objectifs à long terme liés à des niveaux de concentration atmosphérique de GES à ne pas dépasser. Selon les pays, la forme des engagements, leur degré d'ambition et le rythme des réductions annoncées pourront varier. Les éléments suivants pourront être pris en considération :

- Revenu par tête ;
- Niveaux historiques d'émissions ;
- Population ;
- Emission par unité de PIB.

Pour atteindre un consensus sur les réductions nécessaires les éléments suivants seront essentiels :

- Etablissement de seuils progressifs ;
- Etablissement de formules équitables de partage des coûts et des efforts.

Ces considérations nous ont amené à privilégier, dans le cadre de l'approche « ludique » une modélisation retenant les aspects structurels suivants :

- Des objectifs à long terme sur les concentrations de GHG à maintenir stables seront fixés ;
- Une « pondération » des pays participants sera établie qui guidera la répartition des coûts et des efforts de réduction nécessaires pour atteindre ces objectifs à long terme ;

Le rythme des réductions d'émissions sera décidé par chaque (groupe de) pays de manière non-coopérative, en établissant la meilleure réponse, aux actions des autres intervenants, compatible avec les objectifs de long terme et les règles de partage des coûts.

Il nous a paru intéressant de dissocier le comportement non coopératif et l'analyse coût-bénéfice et d'associer plutôt ce comportement avec une analyse coût-efficacité. Selon ce paradigme les acteurs ne peuvent pas contester les résultats des études scientifiques qui indiqueront la sensibilité du climat. L'ensemble des acteurs sera donc confronté à une contrainte qui les lie; pour maintenir des conditions de vie « durable » sur la planète il faudra limiter à un certain niveau les émissions globales de GES cumulées jusqu'en 2050. Cette limite globale aux émissions cumulées deviendra une donnée incontestable quand le résultat des études scientifiques sur le climat seront disponibles. Le jeu entre les acteurs ne porte donc pas principalement sur le niveau de réduction des émissions mais, plutôt, sur la répartition du fardeau et sur le « rythme » des engagements de réduction. Donc les acteurs vont jouer un jeu partiellement coopératif, puisqu'il faudra bien arriver à réduire les émissions selon les prescriptions des climatologues, mais tout à fait non coopératif pour l'établissement du rythme. Le concept de solution pour un tel jeu a été proposé par Rosen sous le nom d'équilibre normalisé dans un jeu avec contraintes couplées.

Le jeu de négociation avec équilibre normalisé peut aussi se formaliser avec une perspective aléatoire concernant la valeur exacte de la sensibilité climatique. Nous pouvons prévoir que cette sensibilité aura été révélée d'ici 2025. Pour l'instant nous en sommes à des conjectures. Quel est le niveau des engagements à prendre dès 2012, compte tenu des coûts anticipés des adaptations nécessaires lorsque l'on saura exactement la valeur de ce paramètre de sensibilité. Pour formuler et résoudre un tel jeu on pourra adapter le concept d'équilibre S-adapté.

Nous avons construit un jeu où 3 groupes de pays sont en concurrence. Il s'agit des Etats-Unis, des autres pays industrialisés et des pays en développement. Nous pouvons comparer cette solution d'équilibre avec celle que nous avons obtenue avec un modèle déterministe. La figure-1 présente les trajectoires d'émissions mondiales qui correspondent à la solution d'équilibre déterministe et à la solution d'équilibre S-adapté[7] sous les contraintes d'émissions cumulées. Dans le cas déterministe, lorsque l'on doit réaliser un objectif de

[7] On appelle « structure d'information S-adaptée » la situation de jeu dynamique où les joueurs peuvent adapter leurs actions aux informations concernant une perturbation aléatoire exogène. Dans le cas du climat cet aléa représente la connaissance que l'on a de la sensibilité du climat.

concentration à 550 ou 650 ppmv en 2100, les émissions de GES croissent linéairement de 9GtC in 2000 à 12.2 et 12.9GtC in 2050, respectivement. Par contre, un objectif de 450 ppmv requiert une action immédiate et les émissions de GES décroissent jusqu'à 7.8GtC en 2025 et 8.8GtC in 2050. Dans le cas stochastique, l'assurance d'atteindre la plus basse concentration requiert un effort de première période déjà très soutenu.

Nous avons aussi représenté en Figure-2 le profil des émissions de GES par région. Dans l'équilibre S-adapté les émissions de GES des Etats-Unis et des autres pays industrialisés sont réduites d'environ 18% sur la période 2000-2025. Les émissions des PVD évolueraient de 4.38GtC en 2000 à 4.24GtC in 2025 ce qui représente une réduction de 3% sur cette période.

Figure 1. Trajectoire d'émissions de GES à l'équilibre

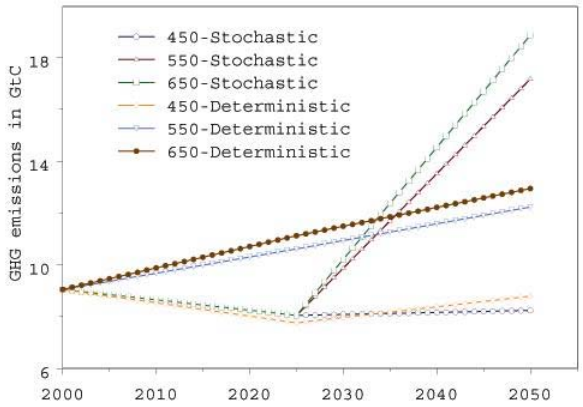
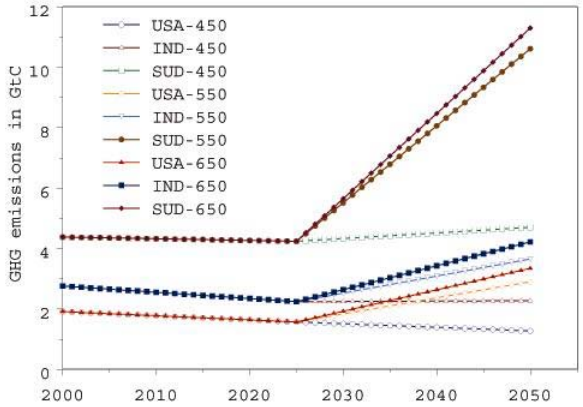


Figure 2. Répartition de l'effort à l'équilibre



Question 2 :Face à une taxe importante sur le carbone, l'OPEP visera-t-elle un prix du pétrole très bas en vue de compenser l'effet de la taxe, ou bien au

contraire tendra-t-elle à optimiser ses revenus en limitant la production pour maintenir un prix élevé ?

a. Leçons de l'approche ludique

Des éléments de réponse à cette question sont fournis par un modèle qui représente de manière schématique la relation « meneur/suiveur » sur le marché du pétrole en tenant compte des liens entre les marchés du gaz, du pétrole et du charbon. Nous avons développé deux versions de ce modèle, l'une statique, l'autre dynamique, à deux périodes. Le modèle a été calibré à partir d'une étude récente effectuée en Norvège et, en ce qui concerne les lois de demande, sur des simulations effectuées à l'aide GEMINI-E3.

Pour identifier les réactions possibles de l'OPEP à l'établissement d'une politique mondiale de réduction des émissions de GES, nous avons construit un modèle d'optimisation hiérarchisé qui représente la concurrence entre les trois formes d'énergie fossile (pétrole, gaz et charbon), qui tient compte d'une réaction de la frange concurrentielle définie par sa courbe d'offre (coût marginal d'extraction) et où l'OPEP fixe le prix du pétrole, tenant compte de l'établissement d'une taxe mondiale sur le carbone.

Ce modèle a été calibré en utilisant le modèle PETRO, développé en Norvège, pour les fonctions de coût et en identifiant les lois de demande à partir d'un ensemble de simulations de GEMINI-E3. Les simulations effectuées à l'aide de ce modèle très simple donnent une indication sur les réactions possibles de l'OPEP à une taxe mondiale sur le carbone. Le tableau-1 indique le type de résultats obtenus. Les deux premières colonnes représentent la taxe carbone ; les colonnes 3-5 indiquent le prix du pétrole (variable de décision), la part de marché et les revenus de l'OPEP ; les colonne 6-8 indiquent l'impact sur la consommation d'énergie fossile et sur les émissions de GES.

Tableau 1. Résultats du jeu « leader/suiveur »

Taxe $/boe	Taxe $/tC	Prix Pétrole	Part de marché OPEP	Revenu OPEP	Total énergie fossile	Total émissions C	% réduction
0	-	16.67	43%	129,762.67	6,481.32	5,700.79	-
5	41.67	17.39	36%	104,503.80	5,417.85	4,637.04	18.66
10	83.33	16.97	32%	84,164.43	4,908.69	4,162.65	26.98
15	125.00	16.01	30%	67,941.75	4,562.19	3,852.92	32.41
20	166.67	14.67	28%	55,066.32	4,298.96	3,623.71	36.43
25	208.33	13.01	28%	45,016.76	4,088.38	3,443.57	39.59
30	250.00	10.96	30%	37,471.26	3,916.60	3,298.57	42.14
33	275.00	5.50	100%	35,583.53	3,833.96	3,229.80	43.34
35	291.67	5.50	100%	34,856.50	3,827.52	3,227.59	43.38
40	333.33	5.50	100%	30,583.91	3,640.78	3,068.25	46.18
50	416.67	5.50	100%	30,552.10	3,379.00	2,848.16	50.04

Les prix du pétrole qui résultent des équilibres offre-demande sont très bas. Un nouveau calibrage des lois de demande dans les modèles macro-économiques serait nécessaire pour rester proche des observations de prix récentes. Cependant les résultats obtenus peuvent être interprétés en termes relatifs. On voit que la structure « leader/suiveur » et la concurrence inter-combustibles n'incite pas le leader à réagir à l'introduction d'une taxe carbone par un

abaissement compensatoire du prix du pétrole au producteur. En fait le prix du pétrole va baisser progressivement quand la taxe carbone va augmenter, réduisant la part de marché du leader, jusqu'au moment où il deviendra optimal d'éliminer la frange concurrentielle en pratiquant un prix égal au coût marginal d'extraction du leader.

b. Enseignements des scénarios POLES

Les enseignements des scénarios POLES sont tout à fait cohérents avec ceux de l'approche par les modèles de jeux. Nous avons croisé trois niveaux de contrainte carbone (nulle, modérée et forte) avec quatre configurations pétrolières différenciée selon la disponibilité du pétrole du Golfe pour répondre à la croissance de la demande mondiale. Cela nous permet d'étudier l'opportunité pour les pays du Golfe Persique de réagir stratégiquement à l'introduction de la contrainte carbone en modifiant leurs politiques pétrolières (dans le sens d'une exploitation plus intensive de la base de ressources, ou au contraire d'un comportement plus restrictif).

Cet exercice est porteur de deux enseignements principaux. Le premier est que seules des politiques climatiques se traduisant par une valeur du carbone très élevée (ici : 100$/t$CO_2$ en 2030, 300$/t en 2040 et 800$/t en 2050) ont, d'ici 2030, un impact significatif sur le marché pétrolier : les prix, la demande, et donc les revenus des producteurs du Moyen-Orient. L'introduction d'une contrainte carbone « modérée » (valeur du carbone de 30$/t en 2030, 40$/t en 2040 et 50$/t en 2050), qui n'est pas suffisante pour stabiliser les émissions mondiales en 2050, a un impact négatif sur les revenus pétroliers mais il reste modéré. Par ailleurs, l'impact de la contrainte carbone forte sur le marché pétrolier ne se manifeste réellement qu'après 2020.

Le second enseignement est que les pays producteurs du Golfe Persique sont très largement démunis face à la dégradation de leurs revenus. Dans un contexte de contrainte carbone modérée, une stratégie de compensation par les quantités (exploitation plus intensive des ressources) permet de compenser environ 50% de la baisse de revenus en 2030 générée par les politiques climatiques (50 G$ sur 100 G$, pour des revenus bruts de 1000 G$ en l'absence de contrainte carbone). Face à une contrainte carbone forte, cette politique pétrolière est beaucoup moins efficace : elle ne permet de compenser en 2030 que 50 G$ sur une perte supérieure à 300 G$.

Nous avons réalisé des projections simulant une configuration pétrolière très restrictive, où les capacités de production du Golfe n'augmentent que marginalement d'ici 2030. Les enseignements de cet exercice sont discutés plus bas (cf. *Question 5*).

Question 3 :Dans un contexte de négociations climatiques avec un régime fragmenté où les PVD et les pays industrialisés se répartissent l'effort de réduction des émissions et décident de manière non coopérative le rythme de ces réductions, quelle serait la politique de prix optimale des pays producteurs de pétrole ?

Nous avons utilisé un modèle de jeu sous forme extensive où l'OPEP annonce une politique de prix et les pays industrialisés (PID) ou en développement (PVD) mettent en place une politique de réduction des émissions qui est un équilibre de Nash, tout en tenant compte de l'éventualité d'une contrainte sévère dans le futur. Ce dernier modèle reprend donc, de manière simplifiée, les éléments discutés préalablement sur la forme des négociations à venir. Cette modélisation tend à montrer que la politique optimale des pays producteurs de pétrole serait de maintenir des prix élevés.

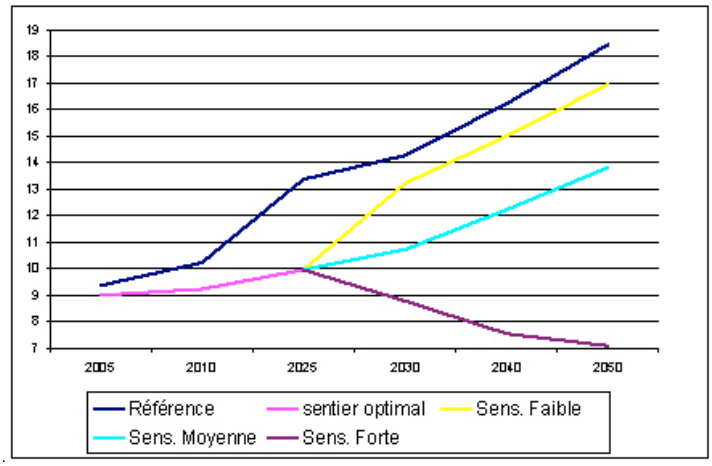
L'examen des résultats du jeu montre que quelque soit la stratégie des pays de l'OPEP, l'équilibre de Nash du jeu consiste pour les PID et les PVD à choisir en première période des niveaux d'émission moyens. Ce résultat peut être expliqué de la façon suivante : Le premier élément d'explication a trait au rythme des réductions des gaz à effet de serre. Toute stratégie consistant à différer les réductions d'émission de gaz à effet de serre peut se révéler très coûteuse dans le cas où la sensibilité du climat s'avérerait forte. A contrario, une stratégie opposée consistant à réduire dès la première période et de façon importante les émissions de gaz à effet de serre pourrait se révéler très inefficace si le changement climatique apparaissait plus limité qu'on ne le pensait. Dès lors la stratégie optimale est bien de réaliser des réductions d'émission moyennes en première période pour ensuite, compte tenu de la révélation de la sensibilité du climat, pouvoir réaliser les réductions d'émission nécessaires sans supporter des coûts trop élevés.

Le second élément guidant les résultats est lié à l'allocation des quotas d'émission retenue dans ce jeu et qui suppose que 40% des droits d'émission sont alloués aux PID et le reste aux PVD. Cette règle conduit dans la majorité des cas les PVD a être offreur de quotas d'émission ; dès lors la stratégie des PVD en première période dépend dans nombre de cas du gain provenant de la vente des permis en seconde période. Ainsi, en présence d'une sensibilité élevée du climat, il peut être optimal pour les PVD de limiter les réductions d'émission de gaz à effet de serre en première période afin d'exacerber la demande de quotas en seconde période, et de bénéficier ainsi d'un prix élevé du carbone.

L'examen des résultats du jeu en fonction du prix du pétrole montre que celui-ci ne modifie pas la hiérarchie entre les différentes stratégies mais opère une redistribution entre les joueurs. Bien évidemment un prix élevé du pétrole bénéficie à l'OPEP, et au contraire pénalise fortement les PID importateurs de pétrole brut. Cet effet est amplifié par une dévaluation de la monnaie des PID qui génère un coût de distorsion au sein de cette zone. Concernant les PVD l'impact est plus limité car la dépendance au pétrole brut est plus faible et les productions domestiques de pétrole sont non négligeables dans cette zone. Rappelons en effet que la zone PVD regroupe notamment les producteurs de l'Amérique latine et de l'Afrique. L'impact d'un prix du pétrole bas a bien entendu un effet symétrique.

La figure-3 ci-après donne les trajectoires des émissions de gaz à effet de serre qui résultent de la simulation de l'équilibre de Nash. La première période du jeu (2000-2025) est bien caractérisée par une baisse des émissions par rapport au compte de référence, qui toutefois permet une croissance modérée des émissions jusqu'à environ 9 GT de carbone en 2025. Ensuite, les émissions baisseraient fortement dans le cas d'une sensibilité élevée du climat pour atteindre en 2050 un niveau d'émission de 7 Gt de carbone. Elles augmenteraient, mais dans des proportions nettement plus limitées que celles du compte de référence, si la sensibilité du climat se révélait moyenne. Enfin, elle augmenteraient selon un taux de croissance proche de celui du compte de référence dans l'éventualité d'une sensibilité faible du climat. En effet dans ce dernier cas l'augmentation du prix du pétrole limiterait le recours aux énergies fossiles et conduirait ainsi à une baisse des émissions de CO_2 par rapport au compte de référence.

Figure 3. Trajectoire des émissions mondiales de gaz à effet de serre (Gt de carbone)



Question 4 :Le renchérissement actuel du prix du pétrole peut- il être perçu comme une bonne nouvelle pour le changement climatique en permettant de réduire nos consommations d'énergie et ainsi nos émissions de CO_2 ?

Compte tenu de l'échec relatif de la mise en œuvre du protocole de Kyoto (consécutif notamment au retrait des Etats-Unis et de l'Australie) et des difficultés à obtenir pour l'après Kyoto la participation des pays en voie de développement, certains pensent que le prix élevé des énergies constitue une bonne nouvelle pour le problème du changement climatique. En effet, un prix élevé forcera les entreprises et les consommateurs à modifier leurs comportements en matière de consommation d'énergie et aura un effet bénéfique sur les émissions de CO_2. Quels que soient les futurs engagements en matière de réduction des gaz à effet de serre, l'apparition d'une nouvelle ère de prix élevés des énergies devrait conduire à des émissions moins importantes que celles prévues précédemment.

Pour explorer cette thématique, nous avons réalisé différentes simulations avec le modèle GEMINI-E3 destinés à évaluer les impacts économiques et environnementaux du choc pétrolier au niveau mondial et régional. Les résultats de cette étude montrent que

certains effets positifs peuvent être attendus d'un renchérissement du prix des énergies sur la base d'un examen historique des phases de prix élevé des énergies : le premier choc pétrolier a en effet conduit à des économies en matière d'énergie et on constate que durant ces périodes l'intensité énergétique a bien décru. Les comportements des acteurs économiques se modifient et des progrès technologiques apparaissent dans le secteur de l'énergie. Une nouvelle période de prix élevés du pétrole pourrait donc permettre de réduire les émissions de gaz à effet de serre.

Cependant notre étude oppose quatre objections majeures à cet argument :

- L'impact d'un prix élevé du prix pétrole sur les émissions de gaz à effet de serre est moins important que celui attendu à cause d'une substitution du pétrole et du gaz naturel par du charbon ;
- Les réductions d'émissions de GES obtenues par ce choc pétrolier sont très inégalement réparties entre les zones géographiques et entre les secteurs ;
- Le coût global de cette réduction de gaz à effet de serre est très élevé en particulier si on le compare à celui obtenu par la mise en place d'un politique climatique efficace (i.e. via la mise en place d'une taxe sur le carbone ou d'un marché de permis d'émission) ;
- La répartition du coût entre les régions est très inégale, et les pays en voie de développement dépendant du pétrole supporteraient une charge très importante.

Question 5 : Quel serait l'impact, sur le système pétrolier et sur l'interaction pétrole/climat, de barrières (choisies ou subies par les pays de la région) à l'augmentation des capacités de production du Golfe Persique ?

A l'aide du modèle POLES, nous avons réalisé une série de projections où la disponibilité du pétrole du Golfe pour répondre à la croissance de la demande est fortement contrainte. Nous avons croisé cette « configuration pétrolière » avec des situations de contrainte carbone nulle, moyenne et forte.

L'impossibilité de recourir massivement au pétrole du Golfe pour répondre à la croissance de la demande se traduit par un phénomène de type « choc pétrolier » : autour de 2015, la demande mondiale vient buter sur le « mur » des capacités de production du Golfe, précipitant une hausse forte et brutale du prix. Ce choc pétrolier a des conséquences très importantes sur la demande pétrolière (qu'il déprime) mais aussi sur la structure de l'offre, et notamment le rythme de développement des pétrole dits non-conventionnels (qu'il accélère fortement). En termes de revenus pétroliers, ces politiques pétrolières ultra restrictives se révèlent très dommageables aux pays du Golfe Persique. Toutefois, elles le sont nettement moins dans un contexte de forte contrainte carbone qu'en l'absence de politiques climatiques ou face à une contrainte modérée.

Au plan des émissions mondiales de CO_2, il n'existe pas de différence significative entre cette configuration pétrolière et les autres. L'apport principal de ces scénarios est de faire apparaître l'intérêt des pays du Golfe à l'égard des politiques climatiques de manière

nouvelle. Les producteurs du Moyen-Orient peuvent se soustraire largement à la « nécessité » d'augmenter massivement leurs capacités sans risquer de créer des ruptures fondamentales dans le comportement du système pétrolier, *à condition que des politiques climatiques ambitieuses soient effectivement mises en œuvre* et viennent limiter la croissance de l'appel au pétrole du Golfe.

Les pays du Moyen-Orient se trouvent donc face à une situation d'incertitude quant à la volonté et la capacité de la communauté internationale à mettre en œuvre des politiques climatiques ambitieuses, *avec un intérêt à ce que ces politiques soient mises en œuvre*. S'ils pensent que ces politiques seront mises en place, et s'ils font face à des contraintes fortes dans la mise en œuvre de leurs plans d'expansion des capacités de production, alors continuer de gérer leur base de ressources de manière très conservatrice est une stratégie sinon optimale, du moins raisonnable. Si ils adoptent une telle stratégie et que les politiques climatiques sont soient absentes, soit très modérées, alors le manque à gagner est très important, en termes de revenus bruts, par rapport à une stratégie d'augmentation massive des capacités.

Autre implication : si les pays du Golfe ne *peuvent* pas investir dans des augmentations significatives de capacités de production, alors il devient (paradoxalement) très important pour eux que des politiques climatiques ambitieuses soient effectivement décidées et mises en œuvre au plan mondial. A défaut, la demande viendra de nouveau buter contre le « mur » des capacités de production du Golfe, générant une explosion des prix qui déprime ensuite la demande et provoque des changements structurels côté offre, notamment en accélérant fortement l'expansion des pétroles non-conventionnels.

Question 6 : Quelle sera l'influence du progrès technique et de l'apparition de nouvelles technologies (en particulier pour la capture et séquestration du carbone) sur la politique du changement climatique et la géostratégie des marchés énergétiques ?

Dans la définition du cadre de cette recherche nous soulignions l'importance de l'incertitude concernant les coûts des nouvelles technologies et la date où ces technologies deviendront disponibles. Nous n'avons pas pu intégrer cet élément dans les jeux que nous avons simulés et résolus. En effet l'outil de simulation économique que nous avons utilisé (GEMINI-E3) ne dispose pas actuellement d'une représentation suffisamment fine de l'impact de nouvelles technologies, tel que, par exemple, la capture du carbone in situ ou la production d'hydrogène à grande efficacité à partir de réacteurs nucléaires de quatrième génération (HTR).

Le modèle POLES contient une description plus riche des technologies mais n'était pas facilement utilisable comme un oracle dans un modèle de jeu. Il faudra donc attendre de disposer d'un lien plus établi entre les modèles « bottom-up » décrivant les nouveaux systèmes de production d'énergie et les modèles « top-down » décrivant les interactions macro-économiques, pour pouvoir intégrer correctement les possibles impacts des nouvelles technologies sur l'économie du changement climatique. En particulier, l'impact des technologies de capture du carbone sur la valorisation des ressources fossiles peut être

important dans le cadre du jeu pétrolier à long terme. Ces éléments vont être repris et étudiés dans le cadre d'un autre projet soutenu par le programme GICC, en utilisant les modèles GEMINI-E3 et TIMES-Monde et en tentant de réaliser le couplage évoqué au paragraphe précédent[8].

Les modèles d'analyse ludique que nous avons présentés dans ce rapport sont destinés à évoluer. Des versions mises à jour seront à la disposition des scientifiques et des analystes à partir du site web de la société ORDECSYS. Les simulations que nous avons présentées dans ce rapport ne sont qu'un premier exemple du type d'étude qu'il est possible de mener en combinant, dans un jeu représentatif des enjeux des négociations à venir, des évaluations économiques obtenues à partir de modèles technico-économiques suffisamment détaillés et des méthodes de calcul d'équilibres utilisant les progrès les plus récents de la programmation mathématique. Nous espérons que ce rapport et les exemples de modèles numériques qu'il contient aura su convaincre le lecteur de l'utilité et de la faisabilité d'une analyse ludique de la négociation post Kyoto.

[8] Il s'agit du projet intitulé: Simulation de stratégies de négociation post-Kyoto dans un régime climatique international fragmenté. mené sous la direction de la Société KANLO, Lyon.