



**HAL**  
open science

## Effet de serre : quelques scénarios

Patrick Criqui

► **To cite this version:**

| Patrick Criqui. Effet de serre : quelques scénarios. *Futuribles*, 2006, 315, pp.65-78. halshs-00007694

**HAL Id: halshs-00007694**

**<https://shs.hal.science/halshs-00007694>**

Submitted on 6 Jan 2006

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Laboratoire d'Economie de la Production et de l'Intégration Internationale  
département Energie et Politiques de l'Environnement  
FRE 2664 CNRS – UPMF

À paraître dans *Futuribles*

## **STABILISER LES CONCENTRATIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE POUR PRESERVER LE CLIMAT DE LA PLANETE**

**Patrick Criqui,**

**Directeur de Recherche au CNRS, LEPII-EPE, Grenoble, Octobre 2005**

L'article 2 de la Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique, élaborée en 1992 lors du « Sommet de la Terre » à Rio, indique que son objectif ultime est de « Stabiliser [...] les concentrations de gaz à effet de serre [GES] dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique ». Parallèlement, l'un des enseignements majeurs des Rapports d'Evaluation du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat<sup>1</sup> est que la stabilisation des concentrations imposera de ramener les émissions à environ la moitié de ce qu'elles sont aujourd'hui, ce niveau devant être atteint d'autant plus rapidement que l'objectif visé pour les concentrations stabilisées est faible. Pour les pays signataires de la Convention, les politiques climatiques – qu'elles soient mises en œuvre dans un cadre national, régional ou mondial – doivent donc viser à faire baisser les niveaux d'émission, dans des proportions d'autant plus importantes que les émissions actuelles sont élevées.

Par ailleurs, la scène énergétique mondiale de la première moitié du XXI<sup>e</sup> siècle sera dominée par l'émergence des nouvelles puissances économiques, la Chine et l'Asie du Sud-Est aujourd'hui, très bientôt l'Inde. Ces régions souhaitent légitimement que leur population dispose d'un meilleur « accès à l'énergie » afin de permettre la satisfaction des besoins élémentaires et, plus généralement, d'améliorer les conditions de vie. Ce phénomène entraîne déjà une rapide augmentation des consommations d'énergie, génératrice de tensions sur les marchés des hydrocarbures. La pression de la demande restera très vive, au moins jusqu'au milieu du siècle lorsque devrait intervenir la stabilisation de la population mondiale. Si, comme cela est probable, l'offre de pétrole et de gaz se trouve contrainte, alors la demande se reportera pour une large part sur le charbon, dont les ressources sont abondantes mais dont les impacts en matière d'émissions de GES sont particulièrement importants.

Entre pression de la demande, « contrainte amont » sur les ressources d'hydrocarbures et « contrainte aval » sur les émissions de GES, la construction de scénarios énergétiques durables relève bien aujourd'hui de la quadrature du cercle. Car il n'y a pas à attendre de solution miracle dans les cinquante prochaines années, alors même qu'elles seront de plusieurs points de vue décisives. Cela rend l'exercice de prospective d'autant plus nécessaire : non seulement le secteur de l'énergie est vital pour l'économie mondiale mais aussi ses constantes de temps – pour modifier les comportements ou introduire de nouvelles options technologiques – sont beaucoup plus longues que celles des technologies de la révolution de l'information. Les « chocs du futur » de l'énergie doivent donc être anticipés, au

---

<sup>1</sup> GIEC, en anglais IPCC pour Intergovernmental Panel on Climate Change. Créé en 1988 par l'OMS et l'Organisation Météorologique Mondiale, le GIEC constitue l'instance scientifique internationale en charge de rassembler et d'organiser les connaissances sur le changement climatique, au sein de trois groupes de travail : Groupe 1 « Les éléments scientifiques », Groupe 2 « Conséquences, adaptation et vulnérabilité », Groupe 3 « Mesures d'atténuation », <http://www.ipcc.ch/>.

risque de dommages irréversibles pour la planète et d'ajustements imposés et brutaux, porteurs de tensions sociales et de crises internationales.

De fait, le secteur de l'énergie reste l'un de ceux dans lesquels l'effort de prospective se maintient et les travaux sont multiples, qu'ils soient directement entrepris ou suscités par des administrations et organisations internationales (Agence Internationale de l'Energie, Commission Européenne, Ministère de l'Industrie, Département de l'Energie américain ...) ou encore par des institutions professionnelles ou scientifiques internationales telles que la Conférence Mondiale de l'Energie ou le GIEC. Les futurs énergétiques sont donc explorés et des consensus partiels apparaissent parfois. Cependant les incertitudes demeurent quant aux tendances spontanées d'évolution du système énergétique mondial, quant à l'écart entre ces évolutions « sans politique » et les évolutions désirables, enfin quant aux moyens et politiques à mettre en œuvre pour combler cet écart.

Dans ce qui suit on présentera tour à tour : les scénarios élaborés dans le cadre du GIEC pour décrire le champ des possibles des scénarios « sans politique », puis les grandes lignes de « scénarios-objectif » permettant de sauvegarder le climat global, enfin les politiques susceptibles d'enclencher la combinaison des changements de comportements et des innovations technologiques qui seront indispensables pour atteindre un développement énergétique durable<sup>2</sup>.

## 1 LES SCENARIOS « SANS POLITIQUE » : ENSEIGNEMENTS ET CONTROVERSES

Le Rapport Spécial du GIEC sur les Scénarios d'Emission<sup>3</sup> a constitué un effort notable pour développer la prospective mondiale des émissions de GES et construire des images du futur cohérentes, tout en identifiant les principales incertitudes. L'étude s'est déroulée sur cinq ans (1995-2000) en parallèle à la préparation du Troisième Rapport d'Evaluation du GIEC et il a permis d'analyser un grand nombre d'études, à partir des travaux de plusieurs équipes, avec des modèles différents mais un cadre d'hypothèses harmonisé. Une des idées premières et structurantes du RSSE fut qu'il était impossible d'identifier un scénario de base ou de référence « plus probable » que les autres. Ce parti-pris méthodologique peut aisément se comprendre car l'avenir est « ouvert et multiple ». On verra cependant plus loin qu'il peut poser problème lorsqu'en vue de la décision politique, il s'agit de prendre la mesure des efforts à entreprendre.

Dans cette perspective des « références multiples » retenue par le RSSE, plusieurs familles de scénarios harmonisés ont donc été développées, après identification de quatre grandes forces motrices ou « *drivers* » : démographie, croissance économique, ressources énergétiques et technologie. Ces familles sont structurées par le croisement de deux jeux d'hypothèses socio-économiques contrastées : d'abord sur le primat de la croissance ou de l'environnement, puis sur la convergence ou la fragmentation des différentes régions du monde. La démarche conduit donc à quatre ensembles de scénarios (Tableau 1). Enfin, pour le scénario de forte croissance avec convergence (famille A1), la prise en compte des ressources et des technologies énergétiques permet de construire trois variantes : intensive en énergies fossiles (A1FI), équilibré (A1B), et intensif en technologies sans carbone (A1T).

Dans ces scénarios, l'association d'une plus faible croissance économique au choix de valeurs sociales plus en faveur de l'environnement pose question. La protection de l'environnement ne peut-elle être au contraire considérée à la fois comme créant de nouvelles opportunités de croissance à court terme et comme la condition d'une croissance soutenue sur le long terme ? Cette problématique n'est pas explicitement abordée par le

---

<sup>2</sup> Cet article reprend certains des éléments d'un rapport scientifique d'évaluation des scénarios d'émission, préparé pour l'organisation Greenpeace.

<sup>3</sup> RSSE, en anglais SRES pour Special Report on Emission Scenarios  
<http://www.grida.no/climate/ipcc/emission/>

RSSE, dont on peut considérer qu'il a croisé les deux jeux d'hypothèses afin avant tout d'ouvrir le champ des futurs, tout en considérant qu'une faible croissance serait plus acceptable socialement dans un monde privilégiant l'environnement.

**Tableau 1: Typologie des scénarios du RSSE**

	Convergence	Fragmentation
Croissance	A1 (A1FI, A1B, A1T)	A2
Environnement	B1	B2

A partir de la grille du RSSE, plus de quarante scénarios ont été simulés, reflétant non seulement l'incertitude sur les forces motrices et les paramètres mais aussi la diversité des modèles et des modes de représentation de la réalité. Les six « scénario marqueurs », élaborés chacun par une équipe précise suffisent à faire apparaître une très large fourchette pour les principaux résultats : de B2 à A1FI les émissions de CO<sub>2</sub> énergétique en 2100 varient de 3,8 à 30,3 GtC; de B1 à A1FI les émissions cumulées sur plus d'un siècle varient de 983 à 2189 GtC (voir Tableau 2, partie supérieure). L'écart est donc considérable : selon les hypothèses retenues les seuls scénarios « sans politique » pourraient conduire à des émissions cumulées sur le siècle allant du simple au double.

**Tableau 2: Les scénarios du RSSE, chiffres-clé et analyse par l'« identité de Kaya »\***

		A1FI	A1 AIB	A1T	A2	B1	B2
<b>Scénarios marqueurs du RSSE : les chiffres-clés</b>							
<b>Population (milliards)</b>	<b>1990</b>	5,3					
	<b>2020</b>	7,6	7,4	7,6	8,2	7,6	7,6
	<b>2050</b>	8,7	8,7	8,7	11,3	8,7	9,3
	<b>2100</b>	7,1	7,1	7	15,1	7	10,4
<b>Energie primaire (Gtoe)</b>	<b>1990</b>	8,4					
	<b>2020</b>	15,9	16,9	15,4	14,2	14,4	13,5
	<b>2050</b>	34,1	32,1	28,9	23,1	19,3	20,7
	<b>2100</b>	49,3	53,0	48,1	40,9	12,2	32,3
<b>Carbone énergie (GtC)</b>	<b>1990</b>	6					
	<b>2020</b>	11,2	12,1	10	11	10	9
	<b>2050</b>	23,1	16	12,3	16,5	11,7	11,2
	<b>2100</b>	30,3	13,1	4,3	28,9	5,2	3,8
<b>C total cumulé (GtC)</b>	<b>1990-2100</b>	2189	1499	1068	1862	983	1164
<b>Scénarios marqueurs du RSSE : analyse par l' "identité de Kaya"</b>							
<b>tc Population</b>	<b>1991-2020</b>	1,2%	1,1%	1,2%	1,5%	1,2%	1,2%
	<b>2021-2050</b>	0,5%	0,5%	0,5%	1,1%	0,5%	0,7%
	<b>2051-2100</b>	-0,4%	-0,4%	-0,4%	0,6%	-0,4%	0,2%
<b>+ tc PIB par habitant</b>	<b>1991-2020</b>	1,9%	2,2%	2,1%	0,8%	1,9%	1,8%
	<b>2021-2050</b>	3,4%	3,4%	3,6%	1,2%	2,7%	1,9%
	<b>2051-2100</b>	2,8%	2,6%	2,6%	1,6%	2,2%	1,3%
<b>+ tc intensité énergétique du PIB</b>	<b>1991-2020</b>	-0,9%	-0,9%	-1,3%	-0,5%	-1,3%	-1,4%
	<b>2021-2050</b>	-1,2%	-1,8%	-1,9%	-0,7%	-2,1%	-1,1%
	<b>2051-2100</b>	-1,6%	-1,1%	-1,1%	-1,0%	-2,6%	-0,6%
<b>+ tc intensité carbone de l'énergie</b>	<b>1991-2020</b>	-0,1%	0,0%	-0,3%	0,3%	-0,1%	-0,2%
	<b>2021-2050</b>	-0,1%	-1,2%	-1,4%	-0,3%	-0,5%	-0,7%
	<b>2051-2100</b>	-0,2%	-1,4%	-3,1%	0,0%	-0,7%	-3,0%
<b>= tc carbone énergie</b>	<b>1991-2020</b>	2,1%	2,4%	1,7%	2,0%	1,7%	1,4%
	<b>2021-2050</b>	2,4%	0,9%	0,7%	1,4%	0,5%	0,7%
	<b>2051-2100</b>	0,5%	-0,4%	-2,1%	1,1%	-1,6%	-2,1%

\*Note : L'« identité de Kaya » permet de décomposer la variation des émissions de CO2 comme le produit de quatre variables significatives : la population (POP), le PIB par tête (PIB/POP), l'intensité énergétique du PIB (ENE/PIB), et enfin l'intensité en CO2 de l'approvisionnement énergétique (CO2/ENE) :

$$CO_2 = (CO_2/ENE) \times (ENE/PIB) \times (PIB/POP) \times POP$$

Aux effets de second ordre près, les taux de croissance par période des quatre variables explicatives (tc) sont additifs :

$$tc(CO_2) = tc(CO_2/ENE) + tc(ENE/PIB) + tc(PIB/POP) + tc(POP) + \varepsilon$$

Source : RSSE et calcul de l'auteur

La décomposition des facteurs de la croissance des émissions à partir de l'« identité de Kaya » fait apparaître continuités, ruptures et valeurs extrêmes dans les éléments-clés des scénarios et elle permet d'expliquer les différences dans les résultats. On peut ainsi identifier (dans les zones grisées du Tableau 2) : la très forte croissance du PIB par habitant dans les scénarios A1 entre 2020 et 2050 ; le maintien de la croissance de la population au delà de 2050 dans A2 ; la forte réduction de l'intensité énergétique du PIB dans B1 ; la très forte décarbonisation de l'énergie après 2050 dans A1T et B2 ...

Incontestablement, les scénarios du RSSE ont constitué une base solide et validée pour les travaux du Troisième Rapport d'Evaluation du GIEC. Mais, comme cela est normal et même constitutif de tout processus scientifique, ces scénarios ont été critiqués et ils ont même donné lieu à une véritable controverse, portant en particulier sur les hypothèses de

croissance économique, avec la contestation à la fois du mode de mesure utilisé et des hypothèses retenues.

Il s'agit notamment de savoir si les PIB de chaque région doivent être mesurés au « Taux de Change du Marché » ou bien en tenant compte des différences structurelles de prix entre pays industriels et pays en développement par un taux de change dit de « Parité de Pouvoir d'Achat ». Ce débat est déjà ancien car on sait que pour les pays en développement la mesure au taux de change du marché conduit à sous-estimer le niveau initial du PIB réel et, parallèlement, à surestimer sa croissance. Selon le rapport récent et très critique de la Chambre des Lords sur « l'économie du changement climatique »<sup>4</sup>, la mesure du PIB au taux de change du marché dans les scénarios RSSE tendrait à surestimer la croissance mondiale et donc les niveaux d'émission dans les scénarios « sans politique » ; le risque climatique serait donc ainsi surévalué, à fins de dramatisation du problème.

Dès 2003 et en réaction à une première vague de critiques, les principaux auteurs du RSSE avaient apporté un ensemble de réponses argumentées<sup>5</sup> et le procès qui est fait au RSSE d'incorporer des biais politiques systématiques est certainement mal fondé. De plus, à supposer qu'on la recherche, l'instrumentalisation des scénarios à des fins politiques serait un exercice délicat et ambivalent : faudrait-il de fait développer des scénarios « sans politique » qui amplifient le problème pour montrer l'urgence d'une politique, mais alors on ne ferait qu'augmenter la difficulté apparente à atteindre ces objectifs ; ne faudrait-il pas au contraire minorer l'écart entre le développement spontané et le développement souhaitable du système, afin de suggérer que les bonnes politiques, visant des objectifs ambitieux seront aisément couronnées de succès ? Du point de vue même d'une hypothétique volonté de manipulation, la réponse ne serait pas évidente.

L'effort d'amélioration des scénarios doit donc être poursuivi, mais selon de véritables lignes de recherche, non sur la base de procès d'intention :

- Les difficultés soulevées par la mesure de la croissance sont réelles et devraient être approfondies, en mettant l'accent sur la nécessaire cohérence entre le mode de calcul adopté pour la croissance et les hypothèses d'évolution des intensités énergétiques.
- De même, l'effort d'amélioration des outils de modélisation et de scénarisation pour l'économie et l'énergie doit à l'évidence être accentué, alors qu'aucune institution internationale ne fournit aujourd'hui d'analyse structurée sur la croissance économique mondiale à très long-terme.

L'exercice RSSE a donc permis de mobiliser différentes ressources pour un exercice de prospective assurant une cohérence d'ensemble et une bonne organisation des résultats. Parmi les principaux, le GIEC souligne en particulier que des jeux d'hypothèses économiques proches peuvent conduire à des résultats très différenciés du point de vue des émissions cumulées (par exemple A1FI et A1T), alors qu'inversement des scénarios socio-économiques très dissemblables peuvent conduire à des résultats proches pour les émissions cumulées (B2 et A1T).

On touche ici un point fort mais aussi une limite de cet exercice. S'il est sans doute bon de faire apparaître les incertitudes, l'éclatement des résultats à la fin du processus fait que le message peut paraître très ambigu aux yeux des décideurs, qui sont sensés prendre la mesure du problème et identifier les objectifs à fixer et les moyens à mobiliser. C'est peut-être ici l'option méthodologique des « références multiples » qui devrait être réexaminée : la conclusion selon laquelle dans le jeu des scénarios « sans politique climatique » le primat de l'environnement sur la croissance suffit à entraîner des bas profils d'émission est proche de

---

<sup>4</sup> Select Committee on Economic Affairs, *The Economics of Climate Change*, House of Lords, Juin 2005 [http://www.parliament.uk/parliamentary\\_committees/lords\\_economic\\_affairs.cfm](http://www.parliament.uk/parliamentary_committees/lords_economic_affairs.cfm)

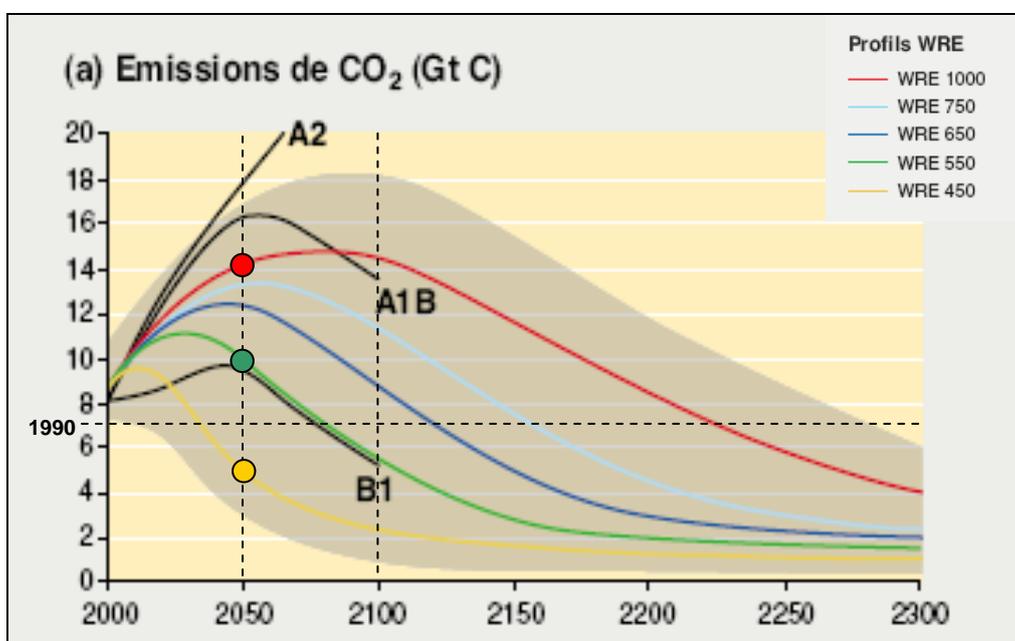
<sup>5</sup> Nakicenovic N. et al., *IPCC SRES Revisited: a response*, Energy & Environment, Vol.3, Nos. 2-3, 2003 <http://www.iiasa.ac.at/Research/TNT/WEB/Publications/ipcc-sres-revisited/ipcc-sres-revisited.html>

la tautologie. Il suffirait donc de mettre en œuvre ce primat – mais comment ? – et le problème climatique serait déjà largement résolu ...

## 2 LES SCENARIOS DE STABILISATION DES CONCENTRATIONS : IMPLICATIONS ET CONSEQUENCES

Aux scénarios « sans politiques » répondent des scénarios d'atténuation du changement climatique par la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Ils sont le plus souvent définis, notamment dans les travaux du Groupe de Travail 1 du GIEC, comme devant répondre à des profils d'émission assurant la stabilisation des concentrations à des niveaux pré-établis : communément pour le CO<sub>2</sub> 450, 550, 650 ppmv<sup>6</sup> etc... . Les scénarios A du RSSE conduisent, à l'exception de A1T, à des profils de concentration très supérieurs à 1000 ppmv. Les deux scénarios B et le scénario A1T s'inscrivent quant à eux sur des trajectoires comprises entre 550 et 650 ppmv.

Figure 1: Profils d'émission pour différents niveaux de stabilisation des concentrations



Source: Figure 6-1 du Résumé du Troisième Rapport d'Evaluation du GIEC, complétée par l'auteur. Les points jaune, vert, rouge correspondent à trois profils d'émission permettant une stabilisation des concentrations à respectivement 450, 550, 650 ppmv CO<sub>2</sub>. En noir apparaissent trois des scénarios du RSSE

Parmi les ordres de grandeur robustes et utiles à retenir pour la décision publique, il apparaît que les niveaux de stabilisation 450 et 550 ppmv-CO<sub>2</sub> imposent un sommet pour les émissions mondiales avant 2030 et des niveaux d'émission en 2050 ramenés à respectivement 70 % et 140 % de celui de 1990. L'ensemble des travaux du Groupe de Travail 3 du GIEC permet de dresser un inventaire des potentiels technologiques et économiques pour l'atténuation, des politiques et mesures susceptibles d'être mises en œuvre, et enfin des coûts et avantages, directs et indirects, de la mise en œuvre des options d'atténuation. Mais le Groupe de Travail 3 ne privilégie pas le choix d'un scénario d'atténuation.

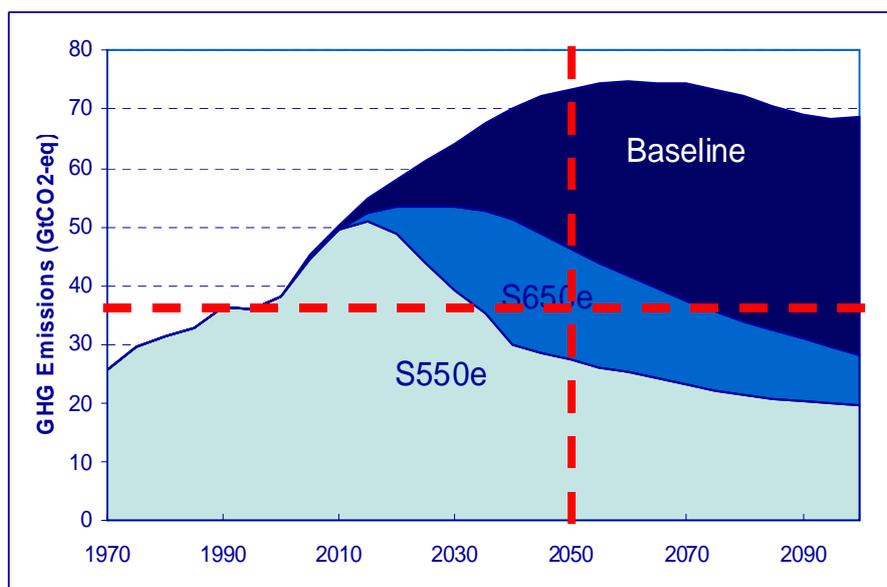
D'autres études ont permis l'exploration de scénarios alternatifs pour la réduction des émissions. C'est le cas notamment en Europe, au niveau de l'Union et dans plusieurs Etats-

<sup>6</sup> particule par million en volume

Membres. Ainsi l'étude Greenhouse gas Reduction Pathways<sup>7</sup> menée à l'instigation la DG Environnement a-t-elle conduit à explorer, d'une part des profils d'émission susceptibles de satisfaire à l'objectif climatique européen<sup>8</sup> et, d'autre part la répartition de l'objectif global entre les grandes catégories de pays, pour plusieurs systèmes d'allocation des droits mondiaux d'émission.

La méthodologie est ici assez radicalement différente de celle du RSSE, puisque l'étude GRP s'appuie sur une « projection de base » (Baseline), définie comme une hypothèse centrale en l'absence de politique climatique (au-delà des engagements déjà pris). Malgré une croissance économique plus faible que dans le scénario A1B du RSSE, mais en raison d'un fort appel au charbon, cette projection de base présente un profil assez comparable à celui d'A1B, avec un doublement des émissions en 2050 par rapport à 1990.

**Figure 2: Profils d'émission dans l'étude Greenhouse gas Reduction Pathways**



Source: Etude GRP

A cette projection de base sont donc opposés deux scénarios-objectif visant à une stabilisation des concentrations pour les six GES du Protocole de Kyoto, l'un à 550 et l'autre à 650 ppmv (S550e et S650e, correspondant à 450 et 550 ppmv pour le CO<sub>2</sub> seul). On retrouve ici un ordre de grandeur très caractéristique et déjà rencontré dans les profils de stabilisation du GIEC : une politique climatique mondiale visant à limiter significativement le réchauffement global devra très probablement viser à revenir en 2050 à un niveau d'émission proche de l'actuel, ce qui constituera un effort considérable compte-tenu des évolutions attendues dans le scénario central. En effet la réduction globale à atteindre par rapport à la projection centrale est dans ce cas de 50 %.

Une fois les enveloppes globales identifiées, il reste encore à décrire quelles pourraient en être les conséquences en termes d'objectifs d'émission pour les différentes régions du monde. Alors qu'il ne peut y avoir de critère unique et faisant consensus d'équité internationale pour la répartition des objectifs entre les différentes régions et pays du monde, l'étude GRP a permis d'explorer les conséquences des différents schémas possibles. A partir de la multiplicité des propositions rencontrées dans la littérature, deux options ont été sélectionnées comme étant potentiellement acceptables par un grand nombre de parties à la

<sup>7</sup> LEPII-EPE et al. (2003), *Greenhouse reduction Pathways in the UN\_FCCC process up to 2025*, EU-DG Environment, <http://europa.eu.int/comm/environment/climat/studies.htm>

<sup>8</sup> Il vise à limiter l'augmentation moyenne des températures à +2°C par rapport à la situation pré-industrielle.

négociation : il s'agit d'une part de celle de la convergence à long terme des émissions par tête et d'autre part des systèmes multi-étapes, ou « *multi-stage* » qui permettent de différencier les objectifs selon le niveau de développement des pays.

**Tableau 3: Objectifs/droits d'émission dans les scénarios Greenhouse gas Reduction Pathways**

Profil d'émission	Augmentation de Température (IPCC2001)	Objectifs 2050 par rapport à 1990	
		Annexe I	Non Annexe I
S650e S550 CO2	+ 2.5°C / pre-ind. + 1.9 °C / auj.	Division par Facteur 2	x 2 Pays Emergents x 5 Pays Moins Avancés
S550e S450 CO2	+1.6 °C / pre-ind. + 1.0 °C / auj.	Division par Facteur 4	x 1 Pays Emergents x 3 Pays Moins Avancés

Source: Auteur, d'après étude GRP

Sans entrer dans la description technique des différentes options et de leurs résultats, il suffit ici de retenir que l'allocation régionale des objectifs d'émission conduit, pour les solutions « acceptables », à des résultats assez robustes (Tableau 3) : dans le scénario de stabilisation à 550 ppmv pour le CO<sub>2</sub>, les émissions des pays de l'Annexe 1<sup>9</sup> doivent être ramenées en 2050 à la moitié de leur niveau actuel, alors que la croissance peut être encore significative dans les pays émergents et a fortiori les pays moins avancés ; pour le scénario à 450 ppmv, la réduction requise est une division par quatre des émissions pour les pays industrialisés, alors que les contraintes se renforcent significativement pour les pays en développement.

### 3 INNOVATIONS TECHNOLOGIQUES, INCITATIONS ECONOMIQUES ET CHANGEMENTS STRUCTURELS

Les ordres de grandeur sont donc donnés : il faudra au plan mondial revenir en 2050 à des niveaux d'émission proches de l'actuel, ce qui impliquera pour les pays industrialisés une réduction des émissions d'un facteur deux à quatre. C'est bien dans cette perspective que s'inscrivent les scénarios dits « Facteur 4 » développés dans plusieurs pays européens, dont la France. Ces scénarios, extrêmement ambitieux, constituent aujourd'hui la frontière à explorer dans les analyses de prospective économique et énergétique, pour définir les traits structurants des sociétés à bas profil d'émission de GES<sup>10</sup>.

Les adaptations impliquées par les scénarios de type Facteur 4 seront la combinaison de changements de comportement, de nouvelles orientations dans les infrastructures, enfin de la diffusion d'un ensemble de nouvelles technologies peu intensives en carbone. Nous reviendrons plus loin sur l'articulation comportements-infrastructures-technologies, mais il faut auparavant dresser une liste des options technologiques qui seront disponibles dans la

<sup>9</sup> Les pays industrialisés, tels qu'identifiés dans la Convention Cadre

<sup>10</sup> Pour la France: Pierre Radanne (2004), *La division par quatre des émissions de CO<sub>2</sub> en France d'ici 2050*

<http://www.effet-de-serre.gouv.fr/fr/etudes/Facteur4-franc%20BAT.pdf>

Hubert Prévot (2004), Diviser par trois en trente ou quarante ans nos émissions de CO<sub>2</sub>

<http://www.2100.org/PrevotEnergie/>

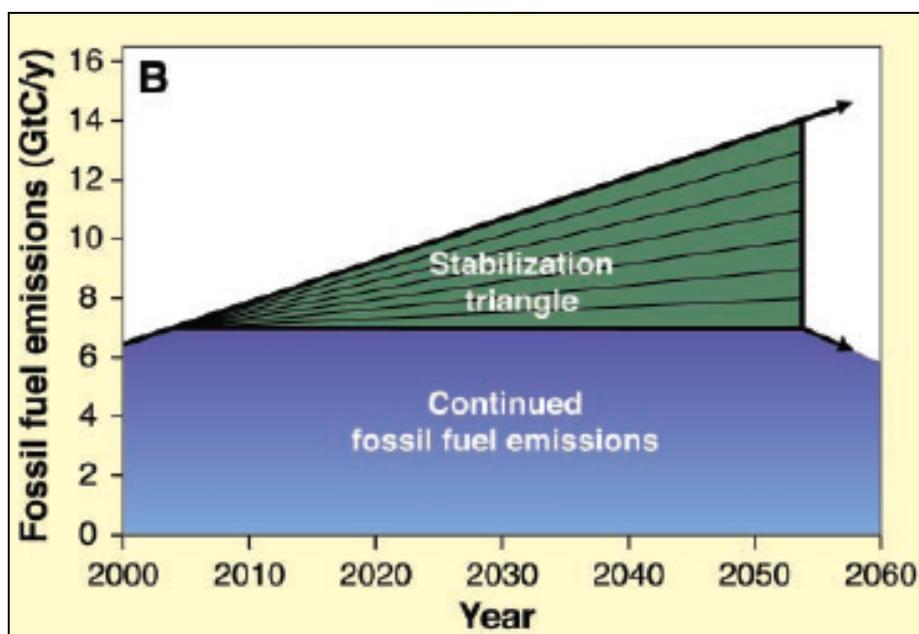
ENERDATA & LEPII-EPE (2005), Prospective énergétique concernant la France ...

<http://www.industrie.gouv.fr/energie/prospect/textes/prosp-jr-2030-2050.htm>

première moitié du siècle, celle qui on l'a vu sera décisive pour la rupture dans les trajectoires d'émission<sup>11</sup>.

Le secteur de l'énergie est un secteur où les options technologiques sont contraintes par le sévère carcan des lois fondamentales de la thermodynamique, c'est de plus un secteur très intensif en investissement et à constantes de temps particulièrement élevées : il n'y a donc pas de miracle à attendre et il n'y aura pas de solution unique. Au contraire la maîtrise des émissions passera probablement par une combinatoire d'options diverses. C'est dans cette optique que R. Socolow et S. Pacala<sup>12</sup>, proposent d'enfoncer une série de « coins » ou *wedges* pour éviter le scénario du doublement et réussir la stabilisation des émissions à 7 GtC (CO<sub>2</sub> énergie) jusqu'en 2050, pour une trajectoire de stabilisation à 500 ppmv (CO<sub>2</sub>). Ils recensent au total une quinzaine de « coins technologiques », regroupés en six portefeuilles et susceptibles selon eux de représenter chacun une économie de 1 GtC en 2050. Il suffirait donc de mobiliser pleinement sept des quinze coins pour atteindre l'objectif (Figure 3).

**Figure 3: Profil de stabilisation des émissions et introduction des « coins technologiques » (wedges)**



NB: la stabilisation des émissions jusqu'en 2050 suivie d'une baisse permet une trajectoire de stabilisation des concentrations à 500 ppmv CO<sub>2</sub>

Source : S. Pacala, R. Socolow, *Stabilization Wedges*

La liste indicative des « coins technologiques » s'établit comme suit :

- efficacité énergétique (bâtiment, transport, industrie et centrales électriques) ;
- électricité décarbonisée (gaz naturel, charbon ou gaz avec capture et stockage du carbone [CSC], nucléaire, renouvelables éolien, solaire, hydraulique, géothermie) ;
- carburants/combustibles décarbonisés (carburants de synthèse avec CSC, biocarburants, hydrogène de source non carbonée) ;

<sup>11</sup> Ce qui signifie bien que le changement de trajectoire devra se faire sans la contribution de l'énergie de fusion qui ne sera dans le meilleur des cas disponible qu'après 2050.

<sup>12</sup> S. Pacala and R. Socolow, *Stabilization Wedges, Solving the Climate Problem for the Next 50 Years with Current Technologies*, Science 13 August 2004, Vol.305, [www.sciencemag.org](http://www.sciencemag.org)

- substitutions de carburants/combustibles par de l'électricité décarbonisée (véhicules à batteries, pompes à chaleur) ;
- utilisation des puits de carbone (forêts, sols agricoles) ;
- gestion du méthane (gaz de décharges, élevage, riziculture, industrie gazière).

Cette approche a le mérite de montrer que la stabilisation n'est pas un objectif hors d'atteinte, que des technologies existent et qu'elles peuvent être mises en oeuvre à des coûts raisonnables. Les auteurs estiment en effet ces coûts comme étant dans la plupart des cas inférieurs à 100 \$/tC, soit 25 €/tCO<sub>2</sub>. Le message est efficace en termes d'information et de mobilisation des décideurs publics ou des industriels, il ne doit pas cependant conduire à sous-estimer la difficulté de la tâche : au-delà des potentiels et des « coûts d'ingénieur », comment peut-on déclencher les processus d'innovation et de changements sociaux nécessaires ?

De plus en plus les modèles énergétiques détaillés s'attachent à explorer ce type de question et à fournir des éléments d'analyse quantifiés. Au cours des dernières années la plupart ont en effet été développés de façon non seulement à identifier les technologies-clé du futur – avec des portefeuilles similaires à ceux identifiés par Socolow et Pacala – mais aussi pour décrire avec plus de précision les dynamiques du progrès technologique. Ainsi la prise en compte des « effets d'apprentissage » voire des impacts de la R&D dans des « courbes d'apprentissage à deux facteurs » permet-elle une endogénéisation du progrès technique dans un nombre croissant de modèles. Les résultats doivent être utilisés avec prudence, car l'innovation est par définition un processus incertain, néanmoins la projection des coûts des différentes technologies à long terme devient dans ce processus beaucoup moins arbitraire que lors d'une simple introduction d'hypothèses exogènes sur les coûts futurs.

Ces modèles « à technologie explicite » permettent d'analyser l'impact de l'introduction d'une valeur du carbone – représentant une taxe CO<sub>2</sub> ou le prix d'un quota d'émission – sur l'« ordre de mérite » des différentes technologies, les décisions d'investissement et enfin les comportements de consommation. On peut alors rechercher le niveau de la valeur du carbone permettant de satisfaire les objectifs d'émission de long terme et analyser la contribution des quatre grandes options : efficacité énergétique, énergies renouvelables, énergie nucléaire et capture et stockage du carbone. Trois grands types de conclusions ressortent des études de ce type aujourd'hui disponibles<sup>13</sup> :

- i Plus l'objectif de réduction des émissions est ambitieux – comme c'est le cas dans les scénarios mondiaux 450 ppmv CO<sub>2</sub> avec Facteur 4 dans les pays industrialisés – et moins il devient possible de se passer de l'une, a fortiori de deux, de ces grandes options. Ainsi, les scénarios de « sortie du nucléaire » ne semblent pas compatibles avec la recherche d'un Facteur 4 dans les pays industrialisés.
- ii La valeur du carbone qui accompagnerait de telles politiques (taxe ou prix du quota) devrait être élevée, et dépasser le seuil des 100 €/tCO<sub>2</sub>, correspondant à un différentiel de coût entre les solutions énergétiques avec et sans carbone équivalent à 45 \$/bl. Ceci permettrait de rendre compétitive la plupart des solutions à bas contenu en carbone. Mais la valeur du carbone devra être plus élevée car dans les scénarios Facteur 4, d'une part chaque option doit être rapidement poussée à proximité de ses limites et, d'autre part la demande doit être fortement contrainte par l'effet-prix (pour l'essence, compte-tenu des taxes existantes, un surcoût de 100 €/tCO<sub>2</sub> ou 45 \$/bl ne représente qu'un supplément de 0,30 € par litre ... on a pu le constater ces derniers mois).

---

<sup>13</sup> Voir par exemple l'exercice mené avec le modèle POLES pour la Direction Générale de l'Energie et des Matières Premières afin de simuler un scénario de Référence et un scénario Facteur 4 pour la France : ENERDATA & LEPII-EPE (2005), op. cit.

- iii Enfin les simulations de scénarios énergétiques mondiaux sous forte contrainte carbone montrent la nécessité de la prise en compte des interactions entre dynamiques des marchés énergétiques et dynamiques des politiques climatiques. En effet, la contrainte carbone limite au plan mondial le retour du charbon aux quantités qui peuvent être utilisées avec séquestration, mais elle limite également de manière notable l'utilisation du pétrole. Dans les scénarios de forte contrainte, l'usage du pétrole est réduit et, sur le marché international, ce produit devient moins rare et moins cher que dans les projections sans politique. L'action mondiale en faveur du climat apparaît alors comme la solution pour gérer en douceur, et par la maîtrise de la demande, un « pic pétrolier » qui sinon sera imposé par les contraintes d'offre. Ce constat mérite sans doute un examen attentif de la part des décideurs politiques ...

Les modèles énergétiques globaux fournissent donc un ensemble d'éclairages indispensables à la définition des politiques climatiques. Mais ils ne permettent pas encore une description complète des conditions de la transition vers des sociétés à bas profil d'émission. Les résultats obtenus pour la valeur du carbone doivent dans ce contexte être pris avec prudence car ils sont d'une certaine manière contingents à l'état actuel de la modélisation. Plus celle-ci progressera dans la description des marges d'ajustement des systèmes techniques et économiques, avec en particulier la prise en compte des changements dans les infrastructures urbaines et de transport ou celle de la dématérialisation-transmatérialisation et plus les estimations de la valeur du carbone seront révisées à la baisse. Ce diagnostic peut susciter quelque frustration, il correspond cependant à l'expérience et renvoie bien à un usage raisonné des modèles économiques, outils imparfaits mais améliorables.

\*

Les scénarios énergétiques mondiaux permettent de faire apparaître l'énorme distance qui sépare les scénarios sans politique des scénarios souhaitables pour la maîtrise du changement climatique. Dans l'état actuel des connaissances, l'enjeu est bien d'éviter le doublement des émissions mondiales à 2050 et d'assurer le retour le plus rapide possible au niveau actuel d'émissions. S'il n'y a pas d'option miracle à attendre pour les cinquante prochaines années, une multiplicité de solutions partielles pourront être mobilisées, au sein de quelques grands portefeuilles technologiques. Le rôle des politiques publiques sera tout d'abord de stimuler le développement des ces portefeuilles par des politiques de R&D adaptées. Cela permettra en particulier de créer les paniers de technologies dans lesquels les acteurs économiques pourront venir puiser lorsqu'ils seront soumis à des contraintes d'émission ou à des incitations économiques croissantes, et de limiter ainsi leurs coûts d'ajustement.

Mais les politiques publiques auront aussi un rôle crucial dans la modification nécessaire de l'aménagement du territoire, des infrastructures urbaines, des réseaux de transport qui devront accompagner la transition vers une société à bas profil d'émission. En effet ces changements sont techniquement nécessaires et ils doivent être entrepris d'autant plus tôt que les constantes de temps sont importantes. Surtout ils seront indispensables pour limiter les pertes d'aménités ou de bien-être occasionnées par l'introduction de nouvelles contraintes fortes dans tous les secteurs de la société. Sur le long terme, les politiques d'infrastructures seront donc le garant de l'acceptabilité locale, par les citoyens, des politiques de protection de l'environnement global.