



ÉCONOMIE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'ÉNERGIE

**2010-2020 : une décennie décisive
pour l'avenir du climat planétaire**

**Patrick Criqui
Alban Kitous**

avril 2012

Cahier de recherche n° 11/2012

2010-2020 : une décennie décisive pour l'avenir du climat planétaire

Patrick Criqui*, Alban Kitous**

L'avenir du climat planétaire à long terme se jouera au cours des prochaines décennies. Alors que le développement économique s'est fondé depuis deux siècles sur le développement massif des énergies fossiles, la question majeure pour l'énergie au XXI^e siècle est certainement celle de la transition vers des systèmes énergétiques bas carbone. Cela supposera des transformations profondes, voire des ruptures, dans les variables structurelles qui caractérisent le développement énergétique de chaque région du monde, en particulier l'intensité énergétique du PIB et l'intensité en carbone du mix énergétique. L'accumulation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère et donc le climat pour les générations futures dépendra directement de la capacité de la communauté internationale à se mobiliser pour mettre en œuvre rapidement les bifurcations nécessaires.

2010-2020 : a decisive decade for our climate

The long term future of the planet's climate will depend of the policies implemented in the next decades. While economic development in the last two centuries has been based on an intensive use of fossil energy resources, the major challenge for the XXIst century is the

* EDDEN/CNRS, Université de Grenoble
patrick.criqui@upmf-grenoble.fr

** IPTS, European Joint Research Center, Séville
alban-gabriel.kitous@ec.europa.eu

transition towards low carbon energy systems. This will impose drastic changes in the dynamics of some fundamentals variables of energy development in every region, in particular the energy intensity of GDP and the carbon intensity of the energy mix. The accumulation of greenhouse gas in the atmosphere and consequently the climate for the future generations will directly depend of the capability of the international community to implement the required changes in economic development patterns.

La conférence de Copenhague fin 2009 devait marquer la relance de la politique climatique au plan mondial. Elle portait beaucoup d'espoirs car elle pouvait correspondre au retour des Etats-Unis sur la scène de la négociation internationale. Ses résultats furent jugés décevants par la plupart des observateurs, qui ne furent d'accord que sur un point : « Maintenant, les pays émergents sont de véritables parties prenantes à la négociation ». Mais s'ils le sont, c'est sur la base de leurs propres positions, non sur celle des schémas proposés par les pays d'industrialisation ancienne, regroupés dans l'Annexe 1¹ de la Convention cadre des Nations unies sur le changement climatique. La conférence de Durban sur le climat, en 2011, s'est achevée sur un accord portant sur l'élaboration à partir de 2015 d'un cadre international de régulation devant entrer en application en 2020.

La décennie en cours sera donc à bien des égards décisive. D'abord parce que si l'on s'en tient au diagnostic formulé par le GIEC [2007a], pour que le changement climatique puisse rester limité à une augmentation de 2°C des températures par rapport à la situation préindustrielle, il faudrait absolument que les émissions mondiales plafonnent au plus tard en 2020 puis décroissent. Ce qui reste aujourd'hui assez improbable. Il y aura donc changement

¹ La liste des pays de l'Annexe 1 de la Convention cadre est donnée ici : http://unfccc.int/parties_and_observers/parties/annex_i/items/2774.php

climatique, mais de quelle intensité ? Ensuite, parce qu'il est clair que le début du XXI^e siècle marque l'émergence d'une nouvelle configuration du monde, au sein de laquelle les pays du Sud acquièrent un poids dominant dans l'économie globale, en termes de production économique, de consommation d'énergie, d'émissions de gaz à effet de serre (GES) : depuis 2005, les émissions de GES des pays hors-Annexe 1 sont devenues supérieures à celles des pays de l'Annexe 1. Enfin, le moment est décisif parce que ce basculement du monde coïncide avec une crise économique et financière sans précédent dans les pays du Nord, si ce n'est la crise de 1929-1933. Cela diminue encore la capacité des États-Unis ou de l'Europe à imposer au plan international un régime climatique répondant à leurs propres objectifs, par ailleurs très divergents.

L'avenir du climat se joue donc dans un contexte de mutation profonde et d'instauration d'un nouvel ordre du monde. Sans doute la situation serait-elle moins critique s'il était encore possible d'attendre une ou deux décennies et la stabilisation de ce nouvel ordre pour s'attaquer au climat. D'autant que l'on aurait alors probablement une meilleure consolidation des savoirs scientifiques. Malheureusement, ce n'est pas le cas : les rejets de GES dans l'atmosphère sont déjà à des niveaux tels que le timing des décisions des toutes prochaines années sera, compte-tenu des irréversibilités, décisif pour le climat des siècles à venir.

Dans la section 1, nous rappellerons d'abord l'histoire d'un développement économique fondé sur les énergies fossiles depuis le déclenchement de la révolution industrielle au début du XIX^e siècle et replacerons dans cette perspective la question du développement énergétique au XXI^e siècle. Puis en section 2, nous analyserons en termes quantitatifs, et à la lumière du passé, les tendances du développement énergétique au XXI^e siècle. Cela en mobilisant « l'équation de Kaya » [Kaya Y., (1997)] qui permet d'identifier quatre variables clés expliquant la dynamique des émissions dans les différentes régions du monde : la population, le revenu par habitant, l'intensité énergétique du PIB, l'intensité en CO₂ du mix énergétique.

Enfin, après avoir ainsi identifié les évolutions requises par les politiques climatiques pour chacune de ces variables, nous tenterons en section 3 de décrire les scénarios possibles pour le régime climatique international : entre le probable dans les conditions actuelles et le souhaitable qui permettrait d'assurer une maîtrise relative des changements en cours.

1. 1800-2100 : deux siècles d'un système industriel fondé sur les énergies fossiles et un siècle de transition ?

Une très brève histoire de l'énergie²

Dans le monde préindustriel, les consommations d'énergie mondiales sont très limitées, de l'ordre de 250 Millions de tonnes équivalent-pétrole (Mtep), si l'on s'en tient aux énergies inanimées, c'est-à-dire hors travail animal et humain. Il s'agit avant tout de bois, car l'énergie hydraulique des moulins à eau et l'énergie éolienne des moulins à vent ou de la marine à voile comptent peu dans le bilan total. C'est donc un approvisionnement 100 % renouvelables, ce qui d'ailleurs induit une très forte inélasticité de l'offre à la demande potentielle d'énergie, puisqu'il n'est simplement pas possible d'augmenter significativement la production. De nombreuses régions connaissent d'ailleurs des situations de désertification qui imposent une intervention de la puissance publique pour préserver ou développer le bien commun que représente le couvert forestier.

Tout change au début du XIX^e siècle avec la conjonction de l'invention de la machine à vapeur double-effet de James Watt en 1782 et les débuts de l'exploitation du « charbon de terre » en Grande-Bretagne. Une boucle de rétroaction positive est alors lancée avec le développement d'une nouvelle machine, forte consommatrice d'énergie mais permettant de développer une puissance importante, et celui d'une nouvelle source qui lève la contrainte

² Pour une histoire plus complète et une périodisation détaillée des systèmes techniques et des énergies depuis la révolution industrielle, on pourra se reporter à l'ouvrage de Freeman et Louçã [2002].

d'inélasticité de l'offre. La révolution de la machine à vapeur alimentée au charbon pour l'industrie est prolongée par celles de la locomotive à vapeur et des chemins de fer, qui à leur tour révolutionnent les transports, en capacité, vitesse et distance. C'est le siècle de la Grande-Bretagne triomphante au plan industriel, économique et politique. Celui de l'emprise sur le monde du « *Rule Britannia* ». A la fin du XIX^e siècle, la consommation mondiale d'énergie s'élève déjà à 1 milliard de tep.

Le premier forage pétrolier moderne est effectué par le Colonel Drake en 1859 à Titusville, mais dans les premiers temps le pétrole n'est utilisé qu'en substitut à l'huile de baleine, puis dans les applications pour l'éclairage. L'histoire du pétrole commence véritablement avec l'invention par Henri Ford de l'automobile de masse, qui va de pair avec les progrès du moteur à explosion alimenté à l'essence. En 1914, Henri Ford, qui anticipe ainsi le couple « production de masse et consommation de masse », aura déjà fait fabriquer 10 millions de Ford T. Dès la première moitié du XX^e siècle, l'industrie du pétrole est déjà une industrie globale, et cependant elle se développe avant tout aux États-Unis. Après la Seconde Guerre mondiale et durant les « trente glorieuses », le modèle américain de l'automobile et des biens de consommation durables des ménages (produits blancs et bruns, tous consommateurs d'électricité) est adopté dans l'ensemble des pays de l'OCDE. C'est la généralisation du fordisme dans les pays du Nord. Le XX^e siècle, avec ses crises et ses guerres mondiales, restera cependant celui de la suprématie américaine et d'un modèle économique hautement dépendant de l'automobile et du pétrole. La consommation mondiale d'énergie passe de deux milliards de tep en 1945 à dix milliards en 2000 : une croissance sans précédent, fondée sur des énergies fossiles, charbon, pétrole et gaz, qui représentent 80 % de l'approvisionnement mondial.

Les premiers craquements surviennent avec les chocs pétroliers de 1973-1974 et 1979-1980, lesquels avaient été précédés en 1972 par le rapport « *The Limits to Growth* » [Meadows D. et

al. (1972)], préparé par le MIT pour le Club de Rome, et par la première Conférence des Nations unies sur l'environnement. Mais après le contre-choc de 1985, l'abondance pétrolière est en apparence recréée et en mars 1999, *The Economist* produit un dossier sur le pétrole avec en couverture la phrase suivante, traduisant ce sentiment d'abondance : « *Drawing in oil* ». Mais si l'on se noie alors dans le pétrole, un autre danger s'est entretemps confirmé : celui du changement climatique entraîné par l'accumulation dans l'atmosphère de ce déchet issu de la combustion des fossiles qu'est le CO₂. Au tournant du XXI^e siècle, les indications scientifiques semblent consolidées quant à l'origine anthropique du réchauffement constaté : « *There is new and stronger evidence that most of the warming observed over the last 50 years is attributable to human activities* », indique le troisième rapport d'évaluation du GIEC [2001]. On peut alors s'attendre, à la suite de la signature du Protocole de Kyoto en 1997, à la construction d'un véritable régime climatique international. Mais l'année 2001 est aussi celle de l'arrivée au pouvoir aux États-Unis d'une nouvelle administration, dont la première grande décision stratégique est précisément le retrait du Protocole de Kyoto. Et la négociation climatique entre alors dans une phase d'enlisement, dont on ne sait encore quelles seront les voies de sortie, après les Conférences des Parties (COPs) de Bali (2007), Copenhague (2009) et Durban (2011). En parallèle, le prix du pétrole n'a cessé de progresser depuis le début des années 2000, ressuscitant les interrogations sur l'état des ressources disponibles.

L'extension du domaine des ressources : des fossiles conventionnels aux non conventionnels

Au début du XXI^e siècle, la recherche d'un développement énergétique durable renvoie donc à un double défi : celui de l'accumulation des GES dans l'atmosphère et celui de la raréfaction de certaines sources d'énergie fossiles. Ces deux menaces pèsent sur le futur et elles sont évidemment liées causalement. A tel point que pour certains tenants de la rareté, le tarissement des fossiles pourrait constituer une solution spontanée ou « naturelle » au

problème des émissions de GES : « supprimez la cause, vous supprimez l'effet ». Or il devient aujourd'hui de plus en plus manifeste qu'il n'en sera rien.

La raréfaction du pétrole conventionnel, qui fut avancée par Marion King Hubbert [1956] pour les États-Unis puis vérifiée par les baisses de production dans ce pays à partir du début des années 1970, est aujourd'hui la problématique mise en avant par les tenants du *Peak oil*, ou pic pétrolier global [Murray J., King D. [2012]]. Cette thèse comporte sa part de vérité car les nouvelles découvertes de pétrole conventionnel, facile et peu coûteux à produire, sont inférieures aux quantités produites chaque année. En témoigne le fait que des prix du pétrole très supérieurs à 60 \$/bl depuis 2005 – soit au moins trois fois les niveaux antérieurs – n'ont pas entraîné une relance significative de la production pétrolière hors OPEP³ et hors CEI⁴. Celle-ci a de fait plafonné depuis la fin des années 1990, la satisfaction de la nouvelle demande provenant depuis de l'OPEP.

Mais l'évolution majeure des dernières années est bien l'émergence des hydrocarbures non conventionnels comme une nouvelle source importante dans l'approvisionnement mondial. C'est évidemment vrai des gaz de schiste qui ont bouleversé la scène énergétique américaine, la faisant basculer d'une situation de pénurie potentielle en 2005 à celle d'un excédent structurel. Cela a aussi permis la baisse des prix du gaz sur le continent nord-américain et sa déconnexion par rapport aux prix du pétrole. Mais il faut souligner également l'essor des pétroles non conventionnels, dont la production a commencé à la fin des années 1990 au Venezuela avec les pétroles ultra-lourds, et au Canada avec les sables asphaltiques [Vially R. (2012)]. Aujourd'hui, c'est la production du pétrole de schiste par hydrofracturation – la technique utilisée pour les gaz du même nom – qui décolle aux États-Unis et permet une

³ Organisation des Pays Exportateurs de Pétrole, qui regroupe les principaux exportateurs de pétrole, à l'exception des exportateurs de l'OCDE et de la CEI.

⁴ CEI : Communauté des États Indépendants, qui regroupe l'ensemble des 15 anciennes républiques soviétiques, à l'exception des 3 États Baltes et de l'Arménie.

certaine reprise de la production, pour la première fois depuis quarante ans. Avec les nouvelles découvertes de gaz naturel en Méditerranée orientale et les énormes réserves de charbon que les grandes compagnies minières développent activement en Asie, il se confirme aujourd'hui que le monde ne risque pas de manquer d'énergies fossiles. Simplement, les approvisionnements sont en train de changer de nature, avec le retour du charbon et la montée des hydrocarbures non conventionnels.

Si la problématique n'est plus celle de la rareté, elle devient celle des coûts économiques et environnementaux, tant locaux que globaux, qu'il faudrait consentir dans un scénario de poursuite d'un mix énergétique dominé par les fossiles. En effet la production des hydrocarbures non conventionnels est aujourd'hui deux fois plus coûteuse économiquement que celle des conventionnels [Vially R. (2012)]. Quant aux impacts écologiques au stade de la production, ils ne sont pas encore clairement mesurés et n'ont pas été étudiés de manière systématique, comme ont pu l'être les coûts de la production de l'électricité dans les études menées par l'Europe dans les projets ExternE [Rabl A., Spadaro J.V. (2001)]. Mais ces coûts sont potentiellement très importants, comme en témoigne visuellement l'état des territoires où sont produits les sables asphaltiques dans le bassin de l'Athabasca au Canada, alors que l'USGS⁵ propose un véritable programme de recherche pour l'évaluation complète des impacts environnementaux de la production des gaz de schiste [Russ D.P. (2011)].

Comment concilier haut niveau de développement humain et sobriété énergétique ?

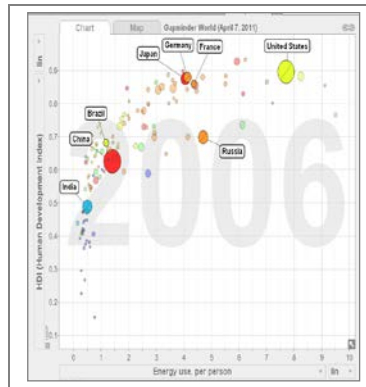
Au début du XXI^e siècle, la situation énergétique mondiale se caractérise donc d'abord par les mutations de l'offre. Quant à la demande, les inégalités internationales dans l'accès à l'énergie demeurent très importantes : un Américain consomme en moyenne chaque année

⁵ USGS : United States Geological Survey, l'agence géologique des USA.

plus de dix fois plus d'énergie qu'un Indien. En conséquence, les inégalités sont fortes aussi dans les émissions par tête de GES, même si les particularités des mix énergétiques régionaux introduisent un élément de différenciation : les émissions par tête de la Chine s'élèvent déjà aujourd'hui à 80% des émissions françaises, alors que la consommation d'énergie par tête dans ce pays ne représente qu'un tiers du chiffre français.

L'examen conjoint des consommations d'énergie par tête et de l'indice de développement humain (IDH) des Nations unies fait clairement apparaître (Figure 1) : i. les pays d'industrialisation ancienne (Annexe 1) avec un IDH supérieur à 0,8 (sauf en Russie) et des consommations annuelles d'énergie supérieures à 2 tep/hab ; ii. les pays émergents et en développement (non Annexe 1) avec un IDH inférieur à 0,8 et des consommations d'énergie inférieures à 2 tep/hab. Certes, la corrélation entre les deux types de variables n'est pas linéaire : un Américain moyen consomme deux fois plus d'énergie qu'un Européen ou un Japonais, mais son IDH est à peu près équivalent. Néanmoins, on doit noter qu'aucun pays aujourd'hui ne combine un IDH élevé et une consommation d'énergie inférieure à 2 tep/hab. Or, ce serait précisément le type de profil qu'il faudrait atteindre pour rendre le développement énergétique durable, dans la double dimension environnementale et sociale du terme. Pour l'heure, il y a bien contradiction entre objectif de bien-être social et objectif environnemental de limitation des consommations d'énergie.

Figure 1. Consommation d'énergie par tête (tep/hab) et indice de développement humain (les surfaces sont proportionnelles aux émissions annuelles de CO₂ de chaque pays).



Source : données Gapminder World, logiciel Trendalyser, www.gapminder.org/world/

Evidemment, la situation évolue extrêmement rapidement dans les pays émergents et une convergence énergétique est en cours. Ceci explique le fait qu'entre 1990 et 2010 les consommations mondiales d'énergie commerciale soient passées de 8 à 12 Gtep (+50 %) et les émissions liées à l'énergie de 23 à 33 Gt de CO₂ (+42 %).

Alors que la crise ne semble pas devoir affecter les pays émergents, le monde est donc à un tournant : s'il n'était possible ni de découpler la croissance économique de la consommation d'énergie, ni de diminuer de manière rapide l'intensité en carbone du mix énergétique, alors les émissions poursuivraient leur croissance selon les fortes tendances des dernières années. Mais cette hypothèse n'est pas la seule à considérer et nous explorons dans la section suivante plusieurs états du monde, du point de vue de la décarbonisation du système énergétique. Tous méritent attention, même si leur probabilité d'occurrence et leur désirabilité sont évidemment très différentes.

2. Le probable et le souhaitable : quels scénarios énergie-climat pour le XXI^e siècle ?

L'équation de Kaya et les fondamentaux de la prospective énergétique

Pour analyser quantitativement les évolutions des consommations énergétiques et des émissions de CO₂ associées, on utilisera l'équation de Kaya qui permet de quantifier la relation croissance-énergie-émissions de GES en isolant les grands facteurs explicatifs que sont la population, le niveau d'activité économique par habitant, les consommations d'énergie pour produire cette richesse et enfin le contenu en CO₂ de l'énergie utilisée. Cette décomposition prend la forme suivante :

$$\text{CO}_2 = \text{CO}_2/\text{ENE} \times \text{ENE}/\text{PIB} \times \text{PIB}/\text{POP} \times \text{POP}$$

- POP = population ;
- PIB/POP = revenu par habitant, qui permet la prise en compte de la croissance économique ;
- ENE/PIB = intensité énergétique du PIB (consommation d'énergie primaire par unité de PIB) ;
- CO₂/ENE = l'intensité en émissions de CO₂ de l'énergie.

Cette équation est analysée ici à partir d'éléments quantitatifs sur trois siècles, depuis 1800 jusqu'en 2100. Les chiffres historiques 1800-2010 ont été élaborés à partir de différentes sources de données (voir Tableau 1 ci-dessous). Les chiffres 2010-2100 sont issus de projections réalisées à partir d'un modèle énergétique mondial, le modèle POLES [Kitous A. *et al.* (2010), Criqui P. et Mima S. (2012)]. Ce type de projection est soumis à l'incertitude des exercices prospectifs et aux limites des outils utilisés, mais donne néanmoins un éclairage sur des évolutions possibles et cohérentes du système énergétique mondial.

Tableau 1. Références utilisées pour l'élaboration des graphiques

	Periode 1800/1900-2000	Periode 1970-2010	Projections 2011-2100
Population	Goudie A. (2000)	UNPD (2011)	UNPD (2011)
PIB	Maddison A. (2007)	Banque Mondiale	modele POLES*
Consommation Energie	Smil V. (2000); Podobnik B. (1999); UN (1952)	Enerdata - AIE	modele POLES**
Prix Energie	BP (2011); ABARE (2007); Smil V. (2000)	Enerdata - AIE	modele POLES**

* Hypothèses élaborées à partir de: *FMI World Economic Outlook, CEPII*

** Projections avec le modèle POLES, dérivées du projet AMPERE

En prolongation des données historiques, trois scénarios prospectifs, dérivés du projet européen AMPERE⁶, sont comparés :

1. Baseline, une projection avec poursuite du développement économique sans mise en place de politique environnementale particulière, mais soumise néanmoins aux contraintes de ressources énergétiques – ce scénario constitue un point de repère ;
2. 550, un scénario de stabilisation des concentrations à 550 ppm CO₂e⁷, soit un régime global de lutte contre les émissions de GES, mais avec un objectif modéré au regard des préconisations du GIEC;
3. 450, un scénario de stabilisation des concentrations à 450 ppm CO₂e, soit un objectif plus contraignant qui permet de respecter l'objectif international d'une augmentation de l'ordre de 2°C des températures à long terme. Ce scénario est le plus souhaitable du point de vue des sciences du climat, mais aussi aujourd'hui sans doute le moins probable.

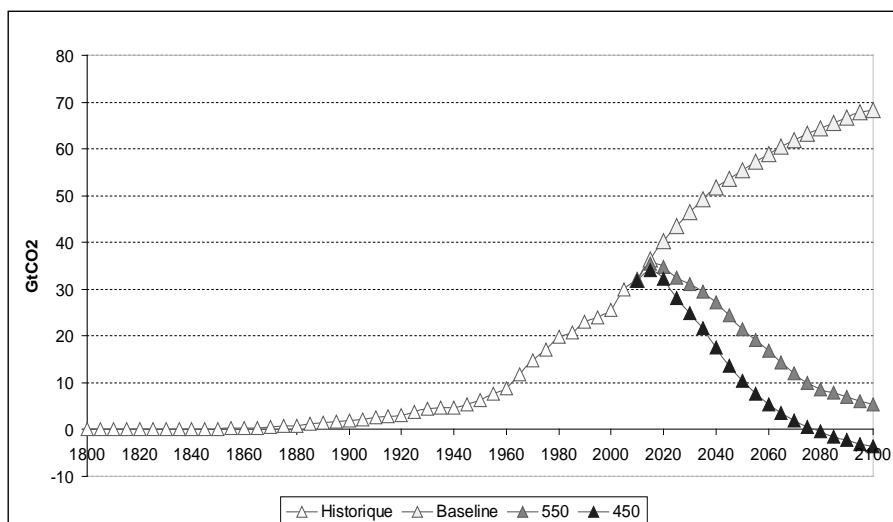
Rappelons que la concentration du CO₂ seul a évolué de 280 ppm à l'époque préindustrielle à 390 ppm aujourd'hui. Le 550 (tous gaz) est donc un scénario ambitieux en termes de mise en

⁶ Le projet AMPERE est financé par le 7^e PCRD de la Commission européenne. Il regroupe l'ensemble des équipes européennes travaillant sur les problématiques de politique climat de long terme. Pour plus d'information voir : <http://ampere-project.eu/web/>

⁷ 550 parties par million de CO₂ équivalent, tous les GES étant pris en compte et convertis dans une unité commune.

œuvre de politiques et le 450 très ambitieux. La Figure 2 donne les émissions de CO₂ historiques et produites par le modèle POLES pour les différents scénarios, les profils 550 et 450 étant dérivés de ceux fournis par le modèle IMAGE [Van Vuuren D. *et al.* (2011)].

Figure 2. Emissions totales* de CO₂ dans les 3 scénarios POLES (1800-2100)⁸



* Emissions du secteur énergétique et de l'industrie, hors émissions de l'agriculture et de l'utilisation des sols.

Source : modèle POLES, IPTS-EDDEN

Les scénarios 550 et 450 sont obtenus via l'introduction dans le modèle d'une valeur carbone, considérée comme une variable approchée (proxy) pour mesurer l'intensité des politiques de réduction des GES. Cette valeur de carbone doit atteindre respectivement 150 et 350⁹ \$/tCO₂ en 2050 pour respecter les trajectoires d'émissions du 550 et le 450, et elle continue à croître ensuite.

Projection de la population et revenus

⁸ Les émissions CO₂ du scénario 450 deviennent négatives sur le long terme, afin de pouvoir respecter l'objectif de concentration de long-terme, après une période dite « d'*overshooting* ». Ce résultat est obtenu par le développement du couplage de la capture et séquestration du CO₂ et de la biomasse, dont la production est supposée neutre en émissions de CO₂.

⁹ Soit toutefois moins de 1 \$ par litre d'essence en 2050 !

Du fait de la chute des taux de mortalité, la population a considérablement augmenté depuis le début du XX^e siècle. Selon la division Population de l'ONU, cette augmentation devrait se stabiliser d'ici le milieu du XXI^e siècle autour de 9 milliards d'habitants, une fois la transition démographique terminée sur tous les continents.

Tableau 2. Population et PIB, Monde – 1800-2100 (pour 2010-2100 projet AMPERE)

	1800	1850	1900	1950	2000	2050	2100*
Population (milliard)	1.0	1.3	1.6	2.5	6.1	9.1	9.3
PIB (T\$05 PPA)	0.7	1.3	3.0	7.4	47	214	498
PIB par habitant (k\$)	0.8	1.0	1.9	2.9	7.7	23.3	53.7
Croissance du PIB par habitant (moyenne annuelle)		0.6%	1.3%	0.9%	2.0%	2.2%	1.7%

* *L'incertitude sur les projections augmente avec le temps. Les chiffres 2100 doivent être manipulés avec précaution.*

Les revenus par tête ont connu une croissance spectaculaire au niveau mondial depuis 1950. Les scénarios reposent sur l'hypothèse d'un maintien de cette forte croissance économique, en particulier dans les pays connaissant aujourd'hui les plus faibles niveaux¹⁰. Ces hypothèses conduisent en 2050 à un produit brut global environ quatre fois supérieur à celui de 2000, à condition que la crise actuelle ne perdure pas et ne s'étende pas au monde en développement. Les hypothèses prospectives de population et de revenus sont inchangées dans les différents scénarios (Tableau 2).

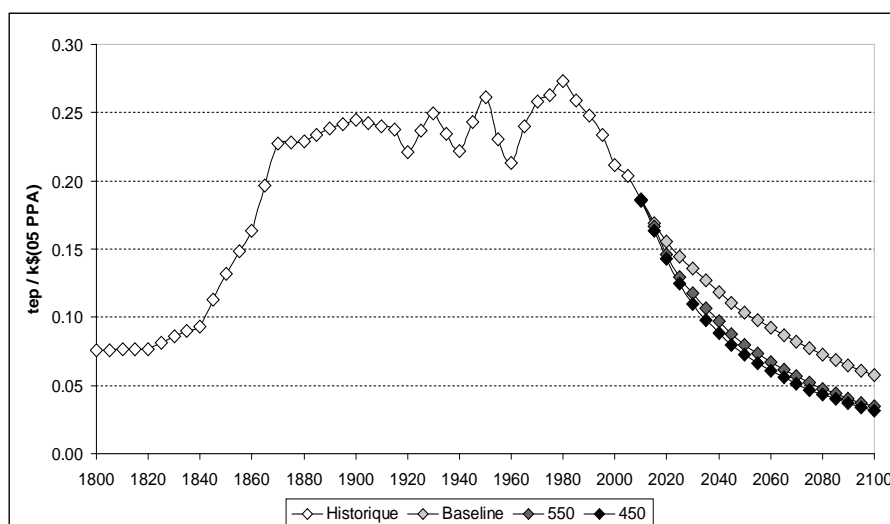
Evolution de l'intensité énergétique : une perspective de long terme

La Figure 3 ci-dessous et la Figure 4 montrent les évolutions de très long terme de l'intensité énergétique du PIB et des émissions CO₂ moyennes de l'énergie consommée au niveau mondial. Cette analyse permet d'évaluer comment les trajectoires futures se comparent à l'historique des besoins en combustibles fossiles décrits dans la partie 1.

¹⁰ Les croissances de la population et des revenus auront probablement des effets significatifs sur l'environnement et la disponibilité des ressources naturelles. La rétroaction de ces effets sur la croissance économique n'est pas traitée ici.

Pour l'intensité énergétique du PIB (Figure 3), on distingue quatre grandes périodes dans l'histoire : avant 1840, l'économie reste essentiellement agricole avec une faible intensité énergétique ; entre 1840 et 1870, le développement rapide de nouvelles industries fondées sur une utilisation intensive du charbon se traduit par une utilisation croissante d'énergie par unité de GDP créé ; à partir de 1870 et jusqu'au début des années 1980, l'intensité énergétique reste remarquablement stable, hormis les variations constatées lors des conflits mondiaux et de la grande crise de l'entre-deux guerres ; depuis, l'instabilité et le niveau élevé des prix de l'énergie, les changements techniques et la tertiarisation d'une partie importante de l'économie ont entraîné une baisse continue de l'intensité énergétique.

Figure 3. Evolution de l'intensité énergétique du PIB 1800-2100



Source : modèle POLES, IPTS-EDDEN

L'évolution future sur la période 2010-2100 telle que projetée dans le cas Baseline (c'est-à-dire sans politique climatique) conduit à une baisse qui se situe en continuité avec celle constatée depuis 1980. Là aussi, les causes principales sont le poids toujours croissant des services dans l'économie mondiale et les coûts de l'énergie plus élevés du fait d'une raréfaction croissante des ressources « conventionnelles » sur lesquelles le développement économique du XX^e siècle s'est appuyé. Les niveaux 2100 rejoignent les niveaux constatés avant la révolution industrielle.

Bien que l'intensité énergétique baisse continûment, la consommation énergétique, elle, continue à croître chaque année jusqu'à doubler en 2050 par rapport à 2000, et presque tripler d'ici la fin du siècle, sous l'effet de la croissance de la population et de la hausse des revenus par habitant qui vont plus vite que la baisse de l'intensité énergétique. Il faut noter que les moyennes par habitant, croissantes sur toute la période, cachent des disparités régionales fortes.

Tableau 3. Consommations d'énergie et émissions de CO₂ associées, Monde

	1800	1850	1900	1950	2000	2050	2100*
Consommation d'Énergie (Gtoe)	0.1	0.2	0.7	1.9	10	22	29
Consommation par habitant (toe)	0.1	0.1	0.5	0.8	1.6	2.4	3.1
Emissions de CO ₂ (GtCO ₂)	0.0	0.2	2.0	6.2	26	55	68
Emissions par habitant (tCO ₂)	0.0	0.2	1.2	2.5	4.2	6.1	7.4

Source : modèle POLES, IPTS-EDDEN

Les scénarios 550 et 450 conduisent tous deux à une baisse encore plus importante de l'intensité énergétique, atteignant à la fin du XXI^e siècle des niveaux deux fois plus faibles que ceux du début du XIX^e siècle. On peut remarquer que ces deux scénarios sont assez peu différenciés en termes d'intensité énergétique, ce qui traduit le fait que la réduction de la demande d'énergie contribue dans des proportions comparables à la réduction des émissions de GES. Cela en vertu de la réaction de la demande à l'augmentation supplémentaire des prix de l'énergie par introduction dans ces deux scénarios d'une valeur du carbone élevée.

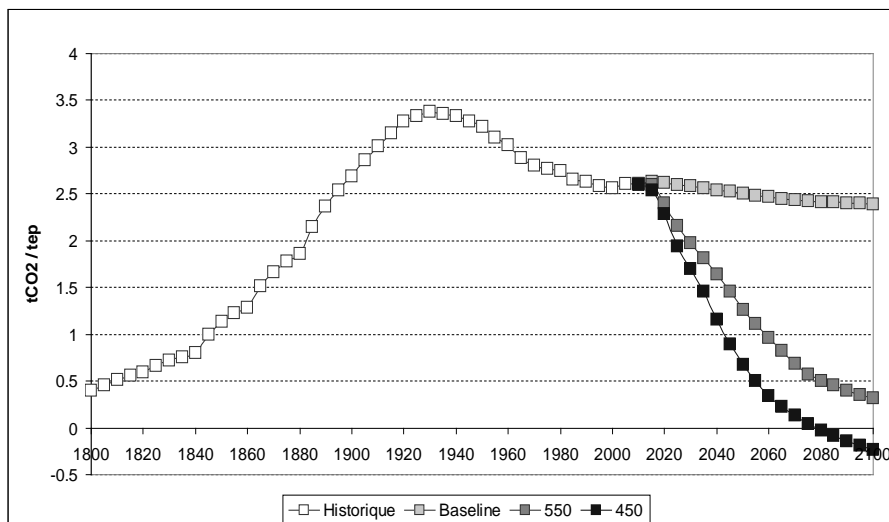
Emissions de CO₂ moyenne par unité d'énergie, ou l'intensité carbone de l'énergie¹¹

Quatre périodes peuvent aussi être identifiées dans l'évolution historique du contenu CO₂ de l'énergie utilisée, qui correspondent à la diffusion de différents types d'énergie dans l'économie : de 1800 à 1920, la hausse continue des émissions moyennes est due à la pénétration du couple charbon et machine à vapeur, moteur du développement industriel ; de

¹¹ Les émissions directes sont calculées à partir des consommations d'énergie : 4 t CO₂/ tep de charbon, 3.7 t CO₂/tep de pétrole, 2.35 t CO₂/tep de gaz. La biomasse est considérée neutre en terme d'émissions, les autres énergies n'émettent pas de CO₂ directement.

1920 à 1950, les émissions moyennes se stabilisent avant de redescendre, sous l'effet de l'utilisation croissante du pétrole, moins émetteur de CO₂ que le charbon ; de même de 1950 à 1980, l'utilisation croissante du gaz naturel et de nouvelles énergies non carbonées (en particulier, le nucléaire, ainsi que les renouvelables en fin de période) poursuit cette baisse du contenu CO₂ de l'énergie ; depuis cette date cependant, l'intensité carbone s'est stabilisée, elle a même eu tendance à augmenter légèrement ces dernières années du fait de l'utilisation croissante du charbon en Asie, en particulier en Chine.

Figure 4. Evolution des émissions CO₂ de l'énergie utilisée – Monde, 1800-2100



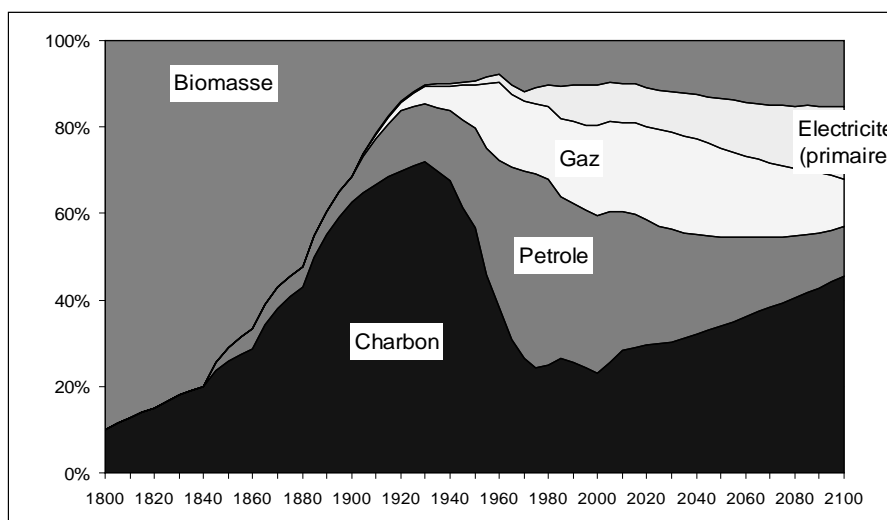
Source : modèle POLES, IPTS-EDDEN

Les scénarios prospectifs mettent en lumière des trajectoires évidemment très contrastées. La projection Baseline est en ligne avec l'évolution récente et montre une utilisation des combustibles fossiles qui se maintient tout au long du XXI^e siècle du fait de l'absence de politique climatique. La stabilité des émissions moyennes est le fruit de deux tendances opposées (cf. Figure 5 ci-dessous) : d'une part, il y a bien le développement des énergies moins carbonées (gaz, renouvelables, dans une moindre mesure nucléaire) ; mais, d'autre part,

on assiste à un appel accru au charbon dans les pays émergents d'Asie¹² combiné au recours à des pétroles non-conventionnels intensifs en CO₂.

Si aucune politique climatique n'est mise en œuvre, on doit donc s'attendre à un doublement de la consommation mondiale d'énergie d'ici 2050 et, du fait d'un « grand retour du charbon », également à un doublement des émissions globales (cf. Figure 2). Pour les sciences du climat¹³, ce scénario conduit à une augmentation des températures à long terme (au-delà de 2100) de l'ordre de 5 à 6°C. C'est à terme un bouleversement du climat qui est enclenché, de manière largement irréversible.

Figure 5. Part des énergies dans la consommation totale – Baseline, Monde, 1800-2100



* L'électricité primaire regroupe le nucléaire, l'hydraulique, le solaire, l'éolien et la géothermie

Source : modèle POLES, IPTS-EDDEN

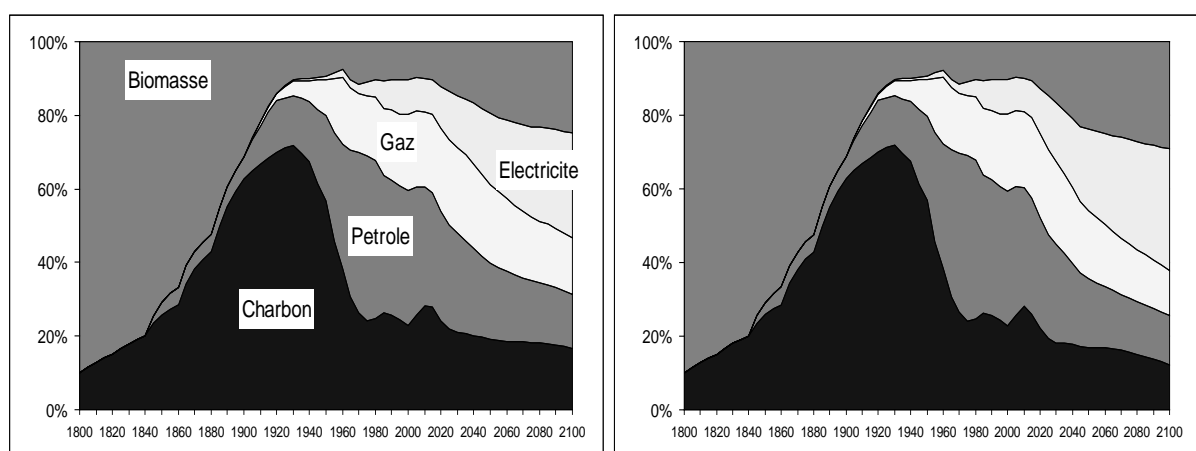
Les scénarios 550 et le 450, dont les profils d'émissions de CO₂ sont imposés pour respecter les objectifs de concentration de long terme, présentent tous les deux des trajectoires en nette

¹² Le fort développement industriel de ces pays ainsi que l'électrification de leur système énergétique passent par un recours au charbon, ressource disponible localement et peu coûteuse tant que les externalités négatives associées à son utilisation ne sont pas prises en compte.

¹³ On trouvera dans le *Résumé à l'intention des décideurs* du quatrième rapport du GIEC [2007b] un tableau essentiel pour la description des impacts de différents scénarios d'émission, le tableau RID.5: Caractéristiques des scénarios de stabilisation post-TRE, p. 16.

rupture et des baisses très importantes du contenu CO₂ de l'énergie¹⁴, illustrant le besoin d'un développement rapide de nouvelles technologies. Ces scénarios projettent un recours accru aux renouvelables (dont la biomasse), le déploiement de la capture et stockage du CO₂ associé à l'utilisation du charbon et du gaz, ainsi que le maintien du nucléaire comme technologie non émettrice de CO₂. La biomasse et l'électricité primaire¹⁵ représentent plus de 50% du mix de long terme dans le 550 (soit un total de 9 Gtep), et 65% dans le 450 (total de 10 Gtep).

Figure 6. Part des énergies 1800-2100 – 550 (gauche) et 450 (droite)



Source : modèle POLES, IPTS-EDDEN

Des évolutions régionales contrastées

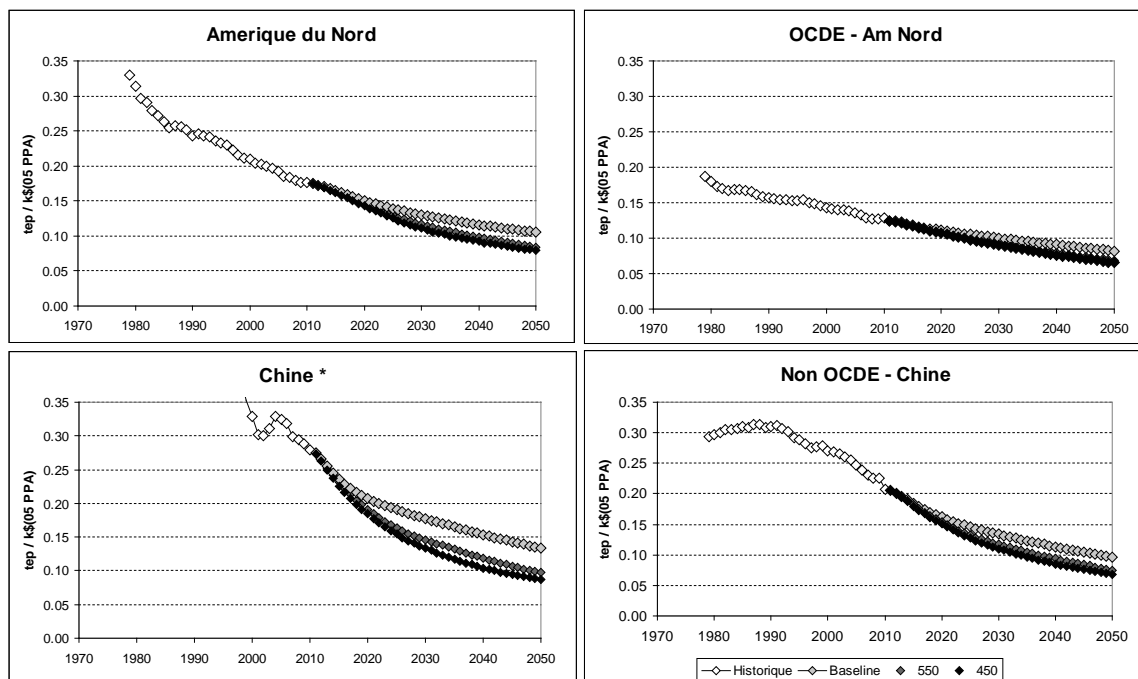
Pour l'intensité énergétique du PIB, la Figure 7 ci-dessous compare les évolutions constatées et simulées entre 1980 et 2050 pour quatre régions : Amérique du Nord (21 % des émissions mondiales de CO₂ en 2010), reste de l'OCDE (22 %), Chine (25 %), reste Non-OCDE (32 %). Partant d'un niveau plus haut, la baisse entre 1980 et 2010 a été plus forte en Amérique du Nord que dans le reste de l'OCDE, le niveau atteint en 2010 étant néanmoins encore de 35 %

¹⁴ En fait des émissions de CO₂ dans l'atmosphère, une partie étant captée et stockée dans des cavités géologiques. La mise en œuvre de cette technologie à grande échelle est néanmoins sujette à beaucoup d'incertitudes, bien qu'étant déjà utilisée pour des applications ponctuelles (amélioration des taux de récupération dans certains champs pétroliers).

¹⁵ Electricité primaire : nucléaire, hydraulique, éolien, solaire, géothermie

supérieur, avec 0,18 tep/\$ contre 0,13 tep/\$. Le niveau élevé de l'Amérique du Nord s'explique principalement par des facteurs géophysiques (étendue du territoire) et historiques (abondance énergétique initiale), également par des niveaux de prix plus faibles (fiscalité) qui concourent à des modèles technologiques et d'organisation sociale beaucoup plus intensifs en énergie, que l'on peut observer au niveau des bâtiments, des automobiles, des biens d'équipement durables des ménages. L'évolution historique de la Chine depuis 1980 est remarquable car elle part d'un niveau d'intensité énergétique extrêmement élevé, de 1,2 tep/k\$ et diminue en trente ans jusqu'à moins de 0,3 tep/k\$ en 2010¹⁶.

Figure 7. Evolution de l'intensité énergétique du PIB (1980-2050)



* En Chine l'intensité énergétique est passée de 1,2 en 1980 à 0,3 en 2000. L'axe a été coupé pour des raisons de comparabilité avec les autres régions.

** Dans les différentes régions la trajectoire 550 est très proche de la trajectoire 450.

Source : modèle POLES, IPTS-EDDEN

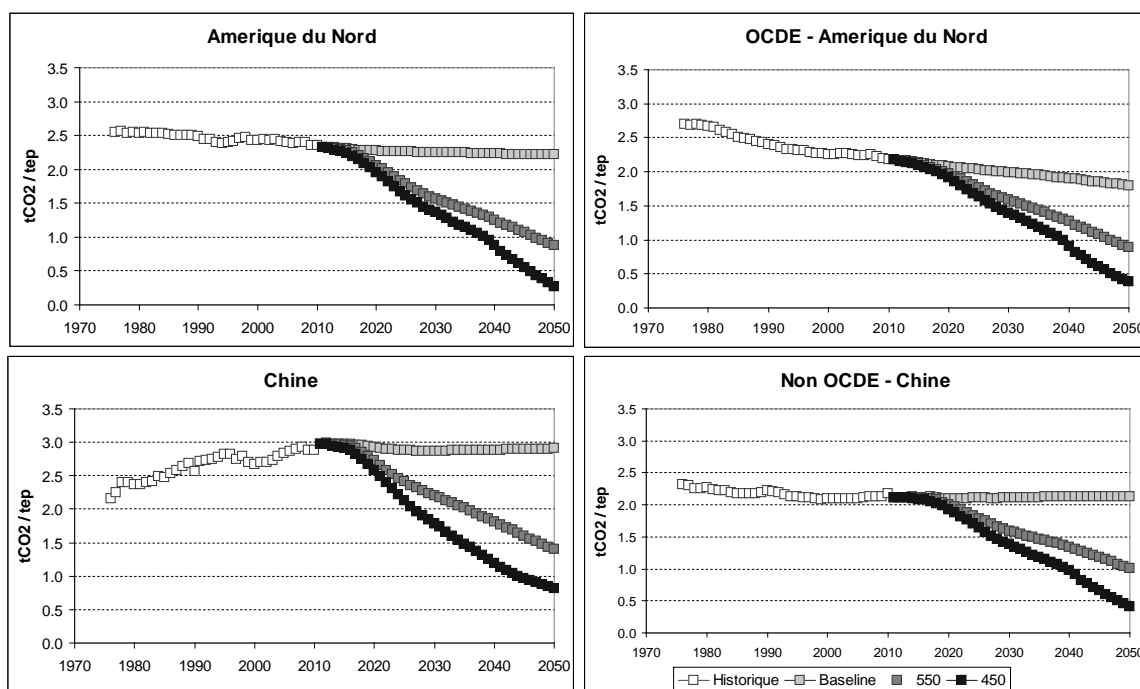
En projection dans le cas sans politique CO₂, cette baisse continue selon la même tendance, pour atteindre 0,1-0,15 tep/\$, soit un niveau proche du niveau moyen du milieu du XIX^e siècle

¹⁶ Cette évolution spectaculaire conduit à s'interroger des problèmes de statistiques en début de période, tant au niveau des consommations énergétiques (potentiellement surévaluées) que du PIB (potentiellement sous-évalué)

(voir Figure 3). Cette baisse est liée à la transformation de l'économie et au renchérissement du coût de l'énergie. La contrainte sur les émissions de CO₂ entraîne une baisse de l'intensité énergétique du PIB par rapport au cas Baseline : de -15 % à -30 % dans le 550, et de -20 % à -40 % dans le 450. Les niveaux atteints pour toutes les régions rejoignent alors les niveaux moyens du début du XIX^e siècle.

Les trajectoires de l'intensité en émissions de l'énergie sont présentées dans la Figure 8 pour les quatre régions, dans lesquelles on observe des évolutions assez différentes depuis 1980 avec : une relative stabilité en Amérique du Nord ; une baisse continue dans le reste de l'OCDE, ce qui constitue la principale contribution à la légère baisse au niveau mondial depuis 1980 ; une forte augmentation en Chine, du fait de l'industrialisation rapide et du recours au charbon (voir le profil mondial de la Figure 4) ; enfin une grande stabilité dans les autres pays émergents ou en développement.

Figure 8. Evolution des émissions de CO₂ par unité d'énergie (1980-2050)



Source : modèle POLES, IPTS-EDDEN

En projection, les évolutions dans la Baseline sont assez proches de cet historique. Sans incitation particulière, le jeu de disponibilité relative des ressources énergétiques (charbon et pétrole non conventionnel contre gaz et renouvelables) explique cette stabilité.

Les choses sont très différentes dans les scénarios de contrainte sur les émissions de CO₂, avec de fortes baisses dans toutes les régions. Tout comme pour l'intensité énergétique du PIB, les niveaux requis en 2050 pour atteindre les objectifs de concentration de CO₂ sont proches du milieu du XIX^e siècle pour le 550 et du début du XIX^e siècle pour le 450, soit autour de 0,5 t CO₂/tep.

3. La décarbonisation du monde : quels éléments pour un pacte climatique global en 2015 ?

L'analyse des variables fondamentales pour le futur du système énergie-climat fait clairement apparaître l'importance des changements supposés par les scénarios de réduction des émissions de GES permettant de limiter le changement climatique. Pour autant, à Durban les grands acteurs de la négociation climat sont convenus que le nouveau pacte global pour le climat devrait être défini au plus tard en 2015, pour qu'il devienne opérationnel en 2020. Au cours des prochaines années, la tension va donc être extrême entre, d'une part des politiques nationales soucieuses de limiter les coûts à court terme de la transition vers des systèmes énergétiques à faibles émissions et, d'autre part, la conduite d'une négociation à nouveau posée en termes d'engagements quantitatifs contraignants. Et l'on assiste au retour du terme de QELRO (*Quantitative emission limitation or reduction objective*) qui fut à la base de l'architecture du Protocole de Kyoto.

Après la première phase des engagements contraignants pour les pays de l'Annexe B à Kyoto, puis la formulation des Mesures d'Atténuation Nationalement Appropriées à Bali, qui se

transforment à Copenhague en engagements nationaux volontaires (*pledges*), il se pourrait que l'on aille aujourd'hui vers une troisième phase dans une synthèse à réaliser en 2015 et à nouveau fondée sur des engagements nationaux contraignants. Deux questions essentielles se posent alors : comment ces engagements nationaux contraignants seront-ils fixés et quel sera le résultat global de leur agrégation ? Il y a tout lieu de penser que la négociation devra s'appuyer sur le concept de *Peak, Plateau and Decline*, tel que proposé par l'Afrique du Sud à Durban¹⁷, parce qu'il reflète bien à la fois les contraintes des politiques nationales et les exigences d'un accord international efficace pour la maîtrise des émissions globales. En tous cas, l'avenir du climat se jouera dans la plus ou moins grande capacité des nations à faire reconverger dans la négociation les approches *top-down* et *bottom-up*.

Retour sur le monde du régime top-down de l'après Kyoto ou le « Global Cap »

Au début des années 2000, la Commission européenne souhaite poursuivre sur la dynamique du Protocole de Kyoto, alors-même que les Etats-Unis de l'administration Bush Jr. se sont retirés du processus. L'étude GRP¹⁸ [Criqui P. *et al.* (2003)], menée pour la DG Environnement, permet alors de dresser un inventaire sélectif comparant les options disponibles pour l'identification des objectifs de réduction des différents pays. Cela évidemment sous la contrainte d'un profil global d'émission ou « *Global Cap* » compatible avec l'objectif du 2°C (énoncé dès un Conseil européen de 1996). L'étude dresse cet inventaire en sélectionnant six approches potentiellement efficaces et acceptables pour le calcul des objectifs nationaux :

¹⁷ Department of Environmental Affairs, Republic of South Africa, Defining South Africa's Peak, Plateau and Decline Greenhouse gas emission trajectory, October 2011.

¹⁸ GRP : Greenhouse Gas Reduction Pathways

- i. la *proposition brésilienne* (PB) met l'accent sur la responsabilité historique des pays industrialisés, en proportionnant les objectifs de réduction aux émissions cumulées à une date repère ;
- ii. la *convergence par tête* ou *Contraction et Convergence* (Contraction & Convergence du Global Commons Institute) conduit à fixer un niveau d'émission par tête à long terme compatible avec l'objectif climatique, puis une date à moyen terme pour la convergence des émissions par tête de chaque pays ;
- iii. l'approche *préférence globale* (PG) calcule les objectifs à partir d'une moyenne pondérée du critère d'égalité des émissions par tête, favorable aux pays du Sud et du critère des émissions héritées (*grandfathering*) préférable pour les pays du Nord ;
- iv. le principe de la *capacité à payer* (ou règle de Jacoby) (CP) proportionne les objectifs de réduction au niveau du PIB par habitant ;
- v. le dispositif *multi-étapes* (ou *Multi-Stage*) (MS) établit un critère de différenciation des pays, puis distingue : a/ les pays industrialisés avec des objectifs absolus, b/ les intermédiaires avec des objectifs dynamiques (i.e. ramenés au PIB) et c/ les pays pauvres sans contrainte ;
- vi. enfin l'approche *atterrissage en douceur* (*Soft Landing*) (SL) raisonne pour chaque pays avec un ralentissement progressif puis une décroissance des émissions absolues.

Sur ces six démarches, deux seulement seront sélectionnées dans l'étude GRP pour tester différents scénarios d'objectifs nationaux pour l'horizon 2025 : *Contraction & Convergence* et *Multi-Stage*. Avec un recul d'une décennie, on peut constater que l'approche *Contraction & Convergence* mérite une attention particulière du fait de sa simplicité et de sa dimension d'égalitarisme, alors que l'approche *Multi-Stage* s'avère constituer un cadre pertinent pour

l'analyse de l'accord élaboré à Copenhague. En effet, Chine et Inde ont alors formulé leurs objectifs de manière dynamique, en termes de réduction de l'intensité en émission du PIB.

La solution *Contraction & Convergence* présente des caractéristiques intéressantes, en particulier parce qu'elle ne nécessite la mobilisation que de deux hypothèses claires, renvoyant à des choix politiques explicites : le niveau d'émission par tête à long terme – directement corrélé aux émissions annuelles – et la date future à laquelle la convergence sur ce niveau moyen devra être atteinte. Elle répond donc, en tendance, à la préoccupation égalitaire « un homme = une voix » ou « un homme = X tonne de carbone ». Elle permet aussi de ménager une période de transition (de plusieurs décennies) entre la situation actuelle, marquée de très fortes inégalités, et la situation après convergence. C'est pourquoi elle est qualifiée par ses promoteurs de porteuse de « justice sans vengeance » (*justice without vengeance*).

Cependant cette proposition peut être discutée, tant du point de vue de l'équité que de celui de l'acceptabilité ou praticabilité. Olivier Godard est sans doute celui qui aura mené le plus loin la discussion critique en la replaçant dans une problématique égalité-équité-acceptabilité [Godard O. (2004)]. Du point de vue de l'équité, la prise en compte des conditions géographiques (climat tempéré ou non, territoire étendu ou dense, par ex. Canada par rapport à l'Italie) comme des conditions historiques (inertie des systèmes techniques et question de la responsabilité actuelle pour les choix des générations antérieures, alors même que le problème n'était pas connu) peut conduire à remettre en cause les mérites apparents de cette solution. Godard suggère que, devant l'aporie créée par la diversité des définitions possibles de la justice internationale, la « justesse » d'une solution doit plutôt être fondée, de manière pragmatique, sur son acceptabilité par les différentes parties. On serait tenté de résumer ainsi son diagnostic : *plutôt l'acceptabilité comme justesse, que l'égalité comme justice*. Quant à

l'approche *Multi-Stage*, on en retrouve des caractéristiques dans l'accord de Copenhague, notamment à travers des objectifs nationaux différenciés selon de grandes catégories de pays.

Copenhague : le monde des « emission pledges » et du bottom-up

Entre Kyoto et Copenhague, douze ans se sont écoulés, qui ont changé la donne économique et politique mondiale. 1997-1998 sont des années de crise financière, mais pour les pays émergents -d'abord dans les pays d'Asie du Sud-Est, puis en Russie. 2007-2009 marque le début de la crise financière pour les pays du Nord -d'abord aux États-Unis, puis en Europe. D'une crise financière à l'autre, l'équilibre du monde a basculé et les émergents, qui se sont « libérés du FMI » en mettant en œuvre des stratégies d'ajustement financier et d'exportation agressive, ont maintenant une position économique dominante, qui se traduit par une croissance exceptionnelle comme par l'envol des consommations d'énergie et des émissions : en 2005, les émissions de GES des pays non-Annexe 1 sont devenues supérieures à celles des pays Annexe 1.

Copenhague marque le fait que les pays émergents sont maintenant embarqués dans le dispositif de négociation. Mais s'ils l'ont fait, c'est sur la base de ce qu'ils sont prêts à accepter, et non en se mouvant dans le schéma du *global cap* prôné par les Européens. En résultent des engagements volontaires, ou *emission pledges*, formulés dans des termes différents selon les pays : réduction des émissions en termes absolus pour les pays Annexe 1, réduction de l'intensité en GES du PIB pour la Chine et l'Inde, réduction par rapport à un Baseline (par ailleurs non clairement défini) pour le Brésil, la Corée, le Mexique. Même s'il n'est pas question d'un indicateur objectif pour distinguer plusieurs catégories de pays comme dans l'approche *Multi-Stage* authentique, on est bien dans un système d'engagements différenciés par décision de chaque pays, avec objectifs absolus pour les industrialisés et dynamiques pour les émergents en forte croissance.

Est ainsi consacré un changement d'approche fondamentale, d'un régime *top-down* à un régime *bottom-up*. La difficulté est évidemment que la somme des *emission pledges* nationales a bien peu de chances de répondre à un objectif global satisfaisant. Et de fait, si les évaluations diffèrent, toutes les analyses convergent sur le diagnostic selon lequel on est bien loin, avec les engagements de Copenhague, d'une trajectoire compatible avec le 2°C, qui est par ailleurs le seul objectif quantifié commun indiqué dans l'accord [Lowe J.A. *et al.* (2010)].

Après Durban : quelle synthèse dans le pacte global pour le climat de 2015 pour 2020 ?

La solution *top-down* conduisant au +2°C est donc souhaitable mais très difficile sinon impossible à mettre en œuvre, et la solution *bottom-up* est possible mais non satisfaisante. Pour « rendre possible ce qui est souhaitable », il faut identifier les modes d'analyse et les processus de négociation susceptibles de remettre en convergence les deux approches. La proposition pourrait être :

- i. de prendre acte du fait que les objectifs doivent être différenciés -comme dans *Multi-Stage* -selon trois catégories de pays, industrialisés, émergents, en développement ;
- ii. de raisonner pour ce faire sur les variables les plus simples et les mieux observables possibles (population, PIB, émissions) afin de construire un indicateur de différenciation tout en réduisant l'espace des controverses méthodologiques ;
- iii. de prendre acte également de la dimension *bottom-up* des *emission pledges*, en considérant dans un premier temps qu'il ne s'agit pas de fixer des objectifs nationaux internationalement, mais de produire un système de comparaison international ; celui-ci doit permettre à la fois de qualifier les engagements nationaux et d'analyser leur cohérence ou non-cohérence avec des objectifs globaux ;
- iv. de fonder cette comparaison à nouveau sur une représentation simple et peu contestable, s'inspirant du « *Peak, Plateau and Decline* » de la proposition sud-

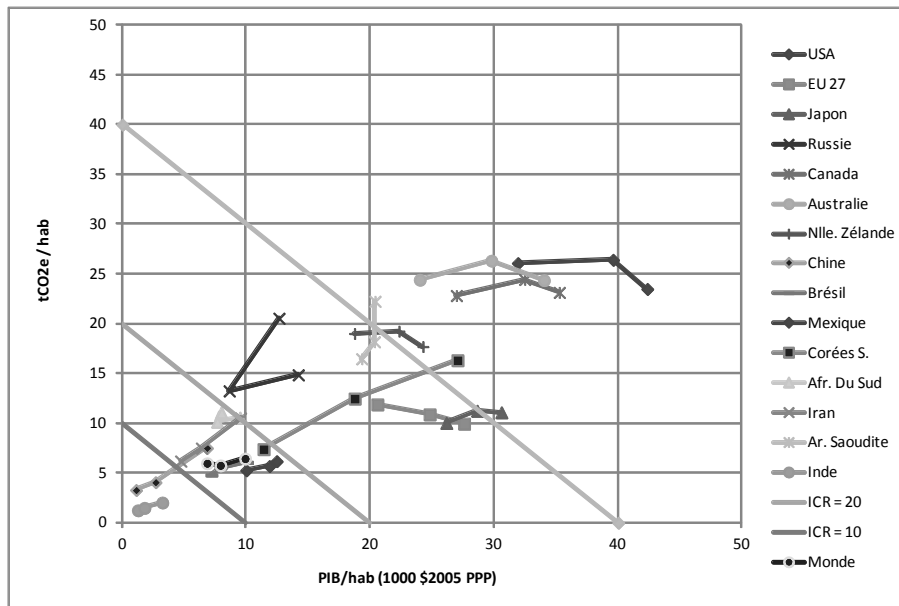
africaine à Durban, et portant comme dans *Soft Landing* sur : a/ la date du plateau (date à laquelle le taux de croissance des émissions devient nul), b/ le taux de décroissance des émissions au-delà ;

v. de vérifier, *ex post*, le fait que les objectifs retenus au plan national vont bien dans le sens d'une convergence des émissions par tête.

Pour construire la différenciation des pays et de leurs trajectoires de référence, il faudra sans doute s'appuyer sur un ou plusieurs indicateurs synthétiques appropriés. Pour ce faire, il serait possible de s'inspirer de la logique de construction de l'IDH, qui agrège un indicateur d'espérance de vie à la naissance, un indicateur de scolarisation et un indicateur de PIB par habitant. Dans l'étude GRP, un indice composite Capacité et Responsabilité¹⁹ (ICR) avait été construit, et calculé comme la somme des émissions par tête (en tCO₂) et du PIB par tête (en k\$). Il fournissait un critère assez discriminant pour isoler les pays de l'Annexe 1 et identifier différentes catégories de pays. Une mise à jour de cet indicateur en 2010 permet de faire ressortir la diversité des situations nationales du point de vue de la capacité à agir et de la responsabilité actuelle dans le problème du changement climatique : en 2010, les Etats-Unis, le Canada et l'Australie présentent un ICR de l'ordre de 60, le Japon et l'Europe de l'ordre de 40, la Chine de 15 et l'Inde de 5 seulement !

¹⁹ L'article 3.1 de la Convention cadre aura été au cœur des discussions dans toutes les négociations : *The Parties should protect the climate system for the benefit of present and future generations of humankind, on the basis of equity and in accordance with their common but differentiated responsibilities and respective capabilities.*

Figure 9. Situation des grands pays sur un repère Capacité - Responsabilité (PIB par tête / émissions par tête, 1990-2000-2010)



Source : EDDEN

Trois types de scénarios possibles

Après Durban, compte-tenu à la fois des enjeux de la décarbonisation tels qu'analysés dans la section 2 et de la grande diversité des situations nationales, trois types de scénarios sont possibles²⁰ : le scénario le plus probable aujourd'hui reste encore celui des politiques nationales non coordonnées et d'intensité modérée ; à l'opposé, un scénario moins probable mais certainement plus désirable serait celui de la construction d'un régime climatique ambitieux, fondé sur des engagements internationaux contraignants, compatibles avec le respect de l'objectif du 2°C ; entre ces deux extrêmes, on trouvera des scénarios « à deux vitesses », dans lesquels seul un noyau de pays s'engagerait sur la voie de la transition énergétique et de la sobriété carbone.

Alors que l'accord de Durban fixe des échéances précises pour le Pacte global sur le climat, l'avenir dépendra certainement de la capacité de la communauté internationale à construire un

²⁰ Voir les scénarios structurels développés pour l'étude Secure effectuée pour l'Union européenne [Criqui P. et Mima S. (2012)].

ensemble de règles et de principes permettant de concilier le réalisme des politiques nationales et la nécessité d'une contrainte globale. Dans l'établissement des bases d'un nouveau régime climatique, il faudra certainement être attentif à trois points cruciaux : i. la nécessité de profiter de la « fenêtre » ouverte par Durban [Stavins R. (2012)] par le fait que l'accord consacre la disparition des catégories Annexe 1, non-Annexe 1, tout en reconnaissant que les objectifs doivent être différenciés pays par pays ; ii. la nécessité de s'appuyer sur des objectifs nationaux, mais en créant les conditions de profils d'émission de référence assurant leur mise en perspective et leur compatibilité avec l'objectif global ; la nécessité sans doute d'abandonner pour un temps dans les négociations internationales la règle de l'unanimité qui, pour certains, explique les échecs des dernières années dans de nombreux domaines [Rocard M. (2012)].

La mise en œuvre d'un dispositif partiel mais susceptible de s'étendre progressivement à un nombre croissant de parties peut sans doute être le plus sûr moyen d'avancer rapidement. Reste évidemment à surmonter le problème du passager clandestin qui constitue depuis toujours la pierre d'achoppement des négociations climat. Malheureusement ou heureusement, la montée des évidences scientifiques, telles que produites par le GIEC sur la réalité des phénomènes comme sur la gravité des conséquences potentielles et de leurs coûts, peut dans les prochaines années constituer la meilleure incitation à coopérer.

Conclusion

Depuis deux siècles, le développement économique et industriel s'est appuyé sur les énergies fossiles. Depuis vingt ans, nous avons pleinement pris conscience des dangers globaux que cela impliquait. L'avenir du climat pour le très long terme se jouera pour une large part dans les dix prochaines années, car une fois le stock de GES constitué, il sera très difficile, si ce

n'est impossible, de revenir en arrière. La responsabilité de la génération présente face aux générations futures est donc très lourde.

Compte-tenu des perspectives démographiques et de croissance économique, la poursuite de sentiers énergétiques compatibles avec la maîtrise du changement climatique pose un double défi : celui de la limitation des consommations d'énergie par la réduction de l'intensité énergétique du PIB, celui de la décarbonisation du « mix » de l'offre énergétique. On l'a vu plus haut, la réduction de l'intensité énergétique requise est très significative, mais elle ne suppose que l'accélération des tendances en cours depuis maintenant trois décennies. En revanche, la décarbonisation de l'offre suppose une véritable rupture par rapport à la tendance actuelle qui est celle de la stabilité, à environ 80 %, de la part des fossiles dans l'approvisionnement. Cela alors même que l'on prend aujourd'hui de plus en plus conscience du fait que ce n'est pas la rareté qui réglera le problème, car le développement des hydrocarbures non conventionnels et du charbon permettrait de maintenir une part élevée des énergies fossiles au long du XXI^e siècle. Or, la décarbonisation de l'offre suppose un développement massif des énergies renouvelables et/ou de l'énergie nucléaire et/ou de la capture et séquestration du CO₂. Or, toutes ces options présentent des verrous à lever, qu'ils soient d'ordre technologique ou social. Seules des politiques nationales et internationales très volontaires sont susceptibles de lever ces verrous.

Dans cette perspective, le processus des négociations internationales, pleinement engagé à Rio en 1992 avec la Convention cadre des Nations unies, n'a certainement pas été vain, mais il marque néanmoins jusqu'à aujourd'hui une certaine impuissance à engager une bifurcation profonde dans la dynamique de développement des systèmes énergétiques. A quelle date les principaux acteurs sur la scène climatique – en particulier la Chine, les Etats-Unis et l'Europe – seront-ils prêts, en termes politiques mais aussi industriels, à s'engager dans cette voie ? C'est de la réponse à cette question que dépendra l'avenir du climat. Ce que l'on doit attendre

de la négociation climatique internationale, c'est simplement qu'elle permette de hâter ce moment.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ABARE [2007], *The recent rise on commodity prices: a long-run perspective*, Reserve Bank of Australia Bulletin, April.

BP [2011], *Statistical Review of World Energy June 2011*. Disponible sur : <http://www.bp.com/sectionbodycopy.do?categoryId=7500&contentId=7068481>, consulté le 9/02/2012.

Criqui P., Mima S. [2012], « European Climate - Energy Security Nexus : a model based scenario analysis », *Energy Policy*, Vol. 41, n° 1, p. 827-842.

Criqui P., et al. [2003], *Greenhouse Gas Reduction Pathways: In the UNFCCC Process up to 2025*. [Brussels, Belgium]. UNT Digital Library. Disponible sur : <http://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc29373/>, consulté le 21/03/2012.

Freeman C., Louçã F. [2002], *As time goes by: from the industrial revolutions to the information revolution*, Oxford University Press, 432 p.

GIEC [2001], *Bilan 2001 des changements climatiques : Rapport de synthèse*, Genève, 184 p.

GIEC [2007a], *Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*, Genève, 103 p.

GIEC [2007b], *Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution du groupe de travail III. Résumé à l'intention des décideurs. Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*, Genève, 26 p.

Godard O. [2004], *L'équité dans les négociations post-Kyoto, critères d'équité et approches procédurales*, Paris : Ecole Polytechnique, 2004, 18 p. (cahier n° 2004-008)

Goudie A. [2000], *The Human Impact on the Natural Environment*, 5th ed. Cambridge : MIT Press.

Hubbert M.K. [1956], *Nuclear energy and the fossil fuels*, publication n° 95, SHELL Development Company et American Petroleum Institute.

Kaya Y., Yokobori K. [1997], *Environment, Energy, and Economy: strategies for sustainability*, Tokyo : UNU Press, 381 p.

Kitous A., Criqui P., Belleprat E., Chateau B. [2010], « Transformation Patterns of the Worldwide Energy System - Scenarios for the Century with the POLES Model », *Energy Journal*, Special Issue, Vol. 31, p. 49-82.

Lowe J.A., et al. [2010], *Are the emission pledges in the Copenhagen Accord compatible with a global aspiration to avoid more than 2°C of global warming?* A technical note from the AVOID program, Met Office Hadley Centre, Exeter, U.K.

Maddison A. [2007], *Contours of the World Economy, 1–2030 AD: Essays in Macro-Economic History*, Oxford University Press.

Meadows D.H., et al. [1972], *The Limits to Growth*, New-York: Universe Books, 205 p.

Murray J., King D. [2012], « Oil's tipping point has passed », *Nature*, n° 481, p. 433-435, 16 January.

Podobnik B. [1999], « Toward a Sustainable Energy Regime: A Long-Wave Interpretation of Global Energy Shifts », *Technological Forecasting and Social Change*, n° 62, p. 155-172.

Rabl A., Spadaro J. V. [2001], « Les coûts externes de l'électricité », *Revue de l'énergie*, n° 525, p.151-163.

Rocard M. [2012], « Don't blame it on Rio », *Project Syndicate*, February 22 2012.

Russ D.P. [2011], « Shale gas production and water resources in the Eastern United States », audition devant le Sénat américain, U.S. Geological Survey, October 20 2011.

Smil V. [2000], « Energy in the twentieth century: Resources, Conversions, Costs, Uses, and Consequences », *Annual Review of Energy and Environment*, Vol. 25, p.21-51.

Stavins R. [2012], « An Unambiguous Consequence of the Durban Climate Talks », *FEEM Review of Environment, Energy and Economics*, March 9.

UNITED NATIONS [1952], *World energy supplies in selected years, 1929-1950*, New-York

UNITED NATIONS [2011], *World Population Prospects: The 2010 Revision*. Geneva : Population Division. Disponible sur : http://esa.un.org/unpd/wpp/unpp/panel_population.htm, consulté le 9/02/2012.

Van Vuuren D., *et al.* [2010], « Exploring IMAGE model scenarios that keep greenhouse gas radiative forcing below 3 W/m² in 2100 », *Energy Economics*, Vol. 32, n° 5, p. 1105-1120.

Vially R. [2012], « Non-conventional hydrocarbons: evolution or revolution? », *Panorama 2012*, Rueil-Malmaison : IFP-EN.