



INSTITUT DE FRANCE
Académie des sciences

ÉNERGIE 2007-2050

LES CHOIX ET LES PIÈGES



Bernard Tissot

Marie-Lise Chanin
Michel Combarous
Robert Guillaumont
Pierre Joliot

Guy Laval
Michel Pouchard
Ionel Solomon
Maurice Tubiana

TOME X - 2007

EXTRAIT

Pages 5 à 10 : **RÉSUMÉ**

Le nouveau rapport du groupe d'experts internationaux IPCC/GIEC a été présenté à l'Académie des sciences début février 2007 à Paris. Ce document confirme la probabilité très élevée d'un changement climatique ainsi que le rôle majeur joué par les émissions de gaz à effet de serre (GES) au cours des 25-30 dernières années.

Quoi qu'on fasse pour limiter les émissions de GES, il est déjà trop tard pour prévenir les premières évolutions climatiques dont les manifestations ont déjà été observées et les développements sont attendus d'ici 2020. Les solutions ne peuvent être exclusivement d'ordre scientifique ou technologique. Il est indispensable qu'elles soient associées à une modification profonde de notre mode de vie, ce qui soulève de lourds problèmes économiques et sociaux.

Les combustibles fossiles - les hydrocarbures et le charbon - représentent toujours les 4/5e de nos sources d'énergie. Il convient avant tout de garder à l'esprit le point majeur mis en évidence dans le précédent rapport de l'Académie des sciences : une erreur considérable, telle que 100 milliards de tonnes d'équivalent pétrole, sur l'évaluation des réserves en pétrole et en gaz ne ferait que décaler de dix ans, dans un sens ou dans l'autre, l'épuisement de ces réserves.

Seules les utilisations du charbon (électricité, chaleur, carburant de synthèse) et celles du nucléaire de fission tel qu'actuellement (électricité), peuvent satisfaire la demande globale en énergie au moins jusqu'à la fin du siècle. Les réserves sont là. Elles pourraient éventuellement être étendues à plusieurs siècles pour le charbon ainsi que pour le nucléaire actuel (neutrons thermiques), si l'on récupère la matière fissile du combustible usé (uranium et plutonium). Au delà, on pourrait atteindre plusieurs millénaires avec des réacteurs à neutrons rapides.

Toutefois, l'exigence d'un développement durable impose d'un côté la séparation et le stockage à long terme du gaz carbonique issu des combustibles fossiles, et de l'autre le règlement satisfaisant du problème des déchets nucléaires.

L'électricité est un vecteur d'énergie privilégié dans les pays industrialisés, au point que sa disposition est une condition nécessaire pour toutes les activités de la vie courante (eau potable, transports publics, communication, etc.), de l'industrie et du commerce. L'électricité prend rapidement une importance croissante dans les pays en transition. Les pays très industrialisés de l'OCDE, ainsi que les grands pays en transition, avec une population nombreuse, auront principalement le souci de produire de **l'électricité « concentrée »** pour alimenter les très grandes villes où se concentre la majeure partie des habitants et de l'industrie.

Or, le charbon apparaît à beaucoup d'industriels comme le relais naturel des produits pétroliers. Les États-Unis et certains pays de l'Union européenne, même s'ils prévoient également une croissance de l'énergie nucléaire, envisagent, pour les décennies proches, des centrales thermiques classiques produisant des GES : au charbon (le plus fort émetteur de CO₂ par kWh électrique produit) ou au gaz naturel, dont les prix tendent à suivre celui du pétrole. Les pays en forte croissance qui disposent de larges réserves de charbon, comme la Chine et l'Inde, utilisent dès maintenant et massivement ce combustible, tant pour générer l'électricité que pour l'usage direct par l'industrie, même s'ils prévoient aussi la construction de plusieurs centrales nucléaires.

Cette orientation oublie l'exigence d'un développement durable : la combinaison capture/stockage à long terme du CO₂ est actuellement la seule voie qui permettrait un relais soutenable des produits pétroliers par le charbon. Ces procédés sont considérés par beaucoup comme acquis, au vu des expériences de taille limitée (1 et 2 millions de tonnes de CO₂ par an) menées en mer du Nord et au Canada sur l'injection de ce gaz dans des aquifères profonds ou dans de vieux gisements pétroliers. En fait, on mesure mal la somme des difficultés qui doivent être contournées. Pour apporter une contribution significative, à l'échéance 2050, il faudrait en capturer 10 à 20 milliards de tonnes chaque année, et les stocker pour plusieurs siècles. Il est bien difficile de transposer un procédé industriel directement à une échelle 10 000 à 20 000 fois plus grande.

Les principales sources d'électricité ne produisant pas de GES sont l'hydroélectricité, si on dispose encore de sites appropriés, et les centrales nucléaires.

Les deux **énergies renouvelables** souvent citées (solaire et surtout éolienne) sont également présentées comme des sources envisageables pour répondre à une demande concentrée et constamment croissante d'électricité, sans générer de CO₂. Certains pays, qui ont décidé de fermer leurs centrales nucléaires, veulent les remplacer par des éoliennes. Le problème principal de ces énergies renouvelables est leur caractère intermittent qui appelle un stockage de l'énergie, particulièrement de l'énergie électrique ; cette limitation

s'exprime par un **average capacity factor** de 20 % au lieu de 80 à 90 % (gaz, nucléaire). Pour 1 000 MW installés, la quantité d'énergie produite en un an est de 8 000 MWh dans le cas du nucléaire et de 2 000 MWh dans l'autre cas. Il ne faut pas que l'enthousiasme pour ces formes d'énergies renouvelables masque la réalité : elles ne seront que des énergies d'appoint.

La **géothermie** est souvent assimilée aux énergies renouvelables et mérite d'être encouragée dans toutes les régions favorables, liées à des zones de tectonique active, en particulier pour la génération d'électricité.

Le **stockage de l'énergie**, et plus particulièrement de l'électricité, constitue un facteur essentiel pour valoriser ces formes d'énergie. En l'absence de cette possibilité, les énergies intermittentes obligent à entretenir une capacité de réserve, reposant sur des centrales au gaz, et se déclenchant à la demande, ce qui accroît les investissements et les émissions de GES.

La solution, souvent mentionnée, de choisir l'hydrogène comme nouveau vecteur d'énergie **stockable et propre** est une solution qui semble plus lointaine, de même que son utilisation pour les transports. En revanche, la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau ne produit pas de CO₂, pourvu que l'électricité soit d'origine nucléaire ou renouvelable. Mais ceci ne serait pas usuel avant le milieu du siècle, vu le délai nécessaire pour développer ces réacteurs et les usines de production de l'hydrogène. Au bilan énergétique global, on risque des pertes à la fois dans le procédé de production de l'hydrogène et dans son utilisation.

La ressource principale pour assurer un développement soutenable reste **l'option nucléaire**. Quels que soient les choix opérés précédemment par les gouvernements ou les citoyens de divers pays dans une situation climatique alors mal évaluée, c'est maintenant une nécessité impérieuse de construire des centrales de génération III, particulièrement sûres, comme l'ont décidé la Finlande, la France et probablement la Chine. Les recherches internationales du programme « Génération IV », visent à accroître les ressources en matière fissile dans quelques décennies et à assurer de l'énergie pour plusieurs millénaires. Les moyens très importants engagés sur la fusion pourraient déboucher dans la seconde moitié du siècle.

Un éventuel échec du développement nucléaire, par idéologie ou faute d'acceptation sociale, nous précipiterait à terme (raréfaction du pétrole et du gaz) dans l'usage quasi exclusif du charbon dans des centrales thermiques, avec pour conséquence un fort accroissement du changement climatique.

L'accroissement de **l'efficacité énergétique**, aux divers stades de la conversion de l'énergie et de l'utilisation finale, est la voie qui, dans tous les domaines, offre les meilleures perspectives pour assurer un équilibre durable. Cet accroissement est cependant plus lié à des problèmes sociologiques (style de vie, longévité des habitations) ou économiques (prix excessif des matériels à faible consommation) qu'à des problèmes scientifiques ou techniques.

C'est dans les **transports** terrestres que les économies seront les plus difficiles. Ce domaine est déjà le plus fort émetteur annuel de CO₂ au niveau mondial et consomme actuellement environ 50 % des produits pétroliers dans les pays en développement, et près de 70 % dans les pays industrialisés. Il présente la plus forte croissance annuelle. La solution la plus efficace à long terme, notamment dans les agglomérations de plusieurs

millions d'habitants, est le transport électrique en site propre (train, métro, tramway ou combinaison de ces divers modes). Sur les longues distances, le trajet Paris-Marseille génère pour un passager 5 kg de CO₂ en TGV, 20 fois plus en avion et 30 à 50 fois plus en voiture. Le mode de transport par rail est privilégié au Japon.

Le fret routier s'est largement développé, notamment en Europe, réduisant la part des transports ferroviaires et de la voie d'eau. L'élargissement de l'Union européenne a renforcé cette tendance. Ce mode de transport est gros consommateur d'énergie, et le captage du CO₂ n'est pas possible. Le seul choix reste entre l'émission toujours croissante de GES et le transfert modal : les charges lourdes (matériaux de construction, véhicules neufs, conteneurs et équipements divers) seront transportables par des voies ferrées électrifiées, puis livrées au client par route sur quelques dizaines de kilomètres. La Suisse a ainsi trouvé un équilibre qui lui permet d'économiser sur l'entretien coûteux d'un réseau routier de montagne.

À diverses reprises, on a préconisé les carburants liquides qui pourraient être préparés à partir du charbon, sans éliminer pour autant les émissions de GES, et seraient compétitifs à partir d'un prix du pétrole évalué successivement à 30, puis 40 \$/bl, etc., alors que ce prix n'est pas redescendu à ces valeurs depuis deux ans et est resté le plus fréquemment supérieur à 60 \$/bl. De plus, les émissions de CO₂ sont réparties entre l'usine de fabrication et le véhicule utilisateur, mais ne diminuent pas pour autant. Les systèmes énergétiques reposant sur l'hydrogène et les piles à combustibles, dont on parle beaucoup, apparaîtront peut-être à titre expérimental vers 2020-2030, mais n'occuperont encore qu'une place mineure au milieu du siècle.

Dans le domaine **résidentiel et tertiaire**, le chauffage solaire de l'eau sanitaire dans des panneaux posés sur des toitures ou des façades est déjà largement appliqué dans certains pays européens ou méditerranéens. Les pompes à chaleur permettent de réduire les dépenses de chauffage. Cependant les uns et les autres rencontrent en France des difficultés sociologiques.

La **biomasse** intervient ordinairement dans le bilan énergétique par son utilisation traditionnelle comme **combustible de chauffe**. Il s'agit certainement là de l'utilisation la plus directe et les pays industrialisés pourraient reconsidérer cet usage. Dans les grandes villes, des réseaux de chauffage urbain en permettraient l'utilisation.

L'usage des **biocarburants** issus de cultures dédiées peut faciliter une période de transition. Néanmoins, la totalité des terres arables du monde ne suffirait pas en 2030 à faire rouler le parc de véhicules. Il existe, à terme, un risque certain de compétition entre la production de carburants pour les véhicules et celle de nourriture pour 9 milliards d'habitants au milieu du siècle. Une autre forme de compétition s'installerait entre l'usage de l'eau (qui n'est pas inépuisable) pour les cultures alimentaires et son usage pour celles visant la production de biocarburants.

De plus, il serait très important de disposer, dans chaque cas, de données précises et fiables sur l'énergie fossile consommée dans l'ensemble du cycle de vie du produit, pour faire un bilan énergétique « du sol à la roue ». Le bilan énergétique est nettement positif au Brésil, où l'on peut produire, à partir de la canne à sucre, jusqu'à 8 litres d'éthanol par fermentation pour un litre de produits pétroliers consommé.

En revanche, l'utilisation de l'ensemble de la biomasse ligno-cellulosique, comme des futaies à courte rotation, pourrait privilégier des terres peu favorables à la production

alimentaire. Cette voie plus complexe permettrait à long terme de produire par gazéification le mélange CO+H₂, puis, par une synthèse chimique de type Fischer-Tropsch, des carburants de haute qualité, en particulier pour les moteurs diesel.

Il faut cependant réaliser que l'ajout au carburant habituel d'une quantité mineure de biocarburant relève d'une adaptation, voire d'une auto-adaptation des moteurs, ce qui s'applique aussi bien au parc ancien. L'ajout d'une quantité majeure de biocarburant (notamment 85 % d'éthanol) est une réelle diversification du véhicule mis sur le marché, avec des moteurs adaptés.

Gardons toujours à l'esprit que **le plus grand apport de la biomasse dans la lutte contre le changement climatique existe et nous le détruisons : il s'agit de la forêt primaire** qui joue un rôle capital dans les échanges de CO₂ entre l'atmosphère, la végétation et les sols.

* *

En l'absence de mesures reconnues par tous les principaux pays consommateurs d'énergie, la situation sera gravement compromise bien avant le milieu du siècle. Même si l'on arrive à ramener, en 2050, les émissions de GES à leur niveau actuel, le poids des premières décennies du siècle subsistera. En effet, la durée de vie du CO₂ dans l'atmosphère est d'ordre séculaire : les concentrations atmosphériques seront en 2050 bien plus élevées qu'à l'époque actuelle et les températures et les désordres climatiques aussi.

Il est urgent de développer **un effort de recherche scientifique et technique** très ambitieux pour pallier tous les manques évoqués dans le texte, tant sur le climat qu'on ne connaît pas suffisamment pour les besoins prévisionnels, que sur les technologies de l'énergie.

Science et technologie sont indispensables, mais **l'économie** et la **sociologie** devraient, elles aussi, être l'objet d'une recherche nouvelle, face à un bouleversement majeur de nos modes de vie.

Pour être en mesure de faire face à des événements imprévisibles, et être capables de réagir vite, il importe avant tout de considérer que, dans cette perspective difficile, les valeurs sociales sont plus importantes que les valeurs économiques. Les conséquences dramatiques pour les personnes âgées de la canicule de 2003 en France, la longue attente des secours et des mesures d'aide après le cyclone Katrina, et la crise sociologique qui l'a accompagné, illustrent ce problème. On peut aussi craindre d'importants déplacements de populations : la submersion des zones les plus basses du Bangladesh poserait un problème majeur d'accueil de plusieurs millions de réfugiés. L'installation et le soutien d'immenses camps de personnes déplacées à l'intérieur d'un pays déjà pauvre seraient un problème d'une difficulté extrême pour la collectivité internationale. Les modèles destinés à évaluer les conséquences de l'évolution climatique et les moyens d'adaptation ne prennent pas en compte les « effets non marchands » (santé humaine, environnement, personnes déplacées). Un **partage équitable des rôles entre nations et générations** sera une tâche difficile.

Les **investissements** des 20 prochaines années auront une influence déterminante sur la situation de la planète au milieu du siècle et même bien au-delà. La capture et le stockage du CO₂ coûteront cher et demanderont des réponses à de nombreux problèmes techniques qui ne seront pas tous prévus. Si les États laissent construire de grandes

centrales thermiques au charbon, sans capture et stockage des émissions, et capables de fonctionner pendant 40 ou 60 ans, notre avenir est irrémédiablement compromis. S'il est difficile d'empêcher la construction de telles installations, il est encore bien plus difficile de les fermer prématurément. Il est également important de se prémunir contre la « délocalisation » du CO₂, c'est-à-dire le transfert des installations vers un pays voisin moins soucieux des contraintes d'environnement, pour importer ensuite de l'énergie électrique, ou encore importer de pays lointains des produits industriels à fort contenu énergétique.

Le rôle des droits **d'émission (ETS, emission trading scheme)** est encore ambigu et la cote est assez confuse. De plus, le prix du carbone émis n'est pas pris en compte dans les décisions d'investissement.

Dans l'état actuel des connaissances, toutes les sources d'énergie seront mises à contribution. Cependant, un ordre de priorité et des conditions nécessaires à leur mise en œuvre devront être observés :

En nucléaire	Gestion des déchets nucléaires
Charbon	Séparation et gestion à long terme du CO₂
Hydraulique, Géothermie	Les sites se font rares et sont souvent éloignés de la demande la plus forte
Biomasse	Ne pas entrer en compétition avec la production de nourriture pour 9 milliards d'habitants au milieu du siècle
Autres énergies	Majoritairement intermittentes (éoliennes, photovoltaïque), donc limitées à une fraction du parc (15 à 20 % ?). Le stockage de l'énergie changerait la donne.

Nous ne sauverons notre mode de vie et nos moyens d'existence ni avec l'ignorance, ni avec l'idéologie, ni avec des déclarations ou des incantations. L'idéologie ne saurait prévaloir sur la science, la technique et l'économie. Tout retard sera coûteux et désastreux, et l'inaction qui se cache derrière la formule business as usual serait une **politique inacceptable**.