

***Académie des technologies***

*Pour un progrès raisonné, choisi et partagé*

**10**

**questions sur l'avenir du charbon**

---

**Gilbert Ruelle**

**Janvier 2005**

# **10**

## **questions sur l'avenir du charbon**

---

### **Gilbert Ruelle\***

---

\* ancien Directeur de la branche alternateurs de Alstom, Président d'honneur du CREEBEL, Membre fondateur de l'Académie des technologies, Président de la Commission Energie-Environnement.

## Introduction

Les questions que se pose le public sur l'énergie et sa relation avec l'environnement portent sur les avantages et inconvénients de chacune des sources et sur les zones incertaines, notamment celles qui nécessitent de la recherche et du développement plus ou moins longs avant que des réponses puissent être apportées. Le rapport de synthèse de la Commission Energie et Environnement" « *Prospective sur l'énergie au XXI<sup>e</sup> siècle* » aborde l'ensemble de ces questions.

L'Académie des technologies a cependant souhaité qu'à côté de ce rapport de synthèse, des sujets spécifiques soient abordés sous une forme plus courte de « 10 questions sur... », ces questions pouvant porter sur une énergie particulière : charbon, pétrole, gaz, biomasse, hydrogène...ou sur un aspect particulier de la relation énergie-environnement, par exemple les déchets nucléaires ou le développement des véhicules hybrides.

**C'est la question de l'avenir du charbon** qui est abordée dans ce dossier : sera-t-il condamné par ses nuisances sur l'environnement? Ou reste-t-il une énergie d'avenir favorisée par l'ampleur de ses réserves et son absence de risque géopolitique?

Le charbon a été la première énergie fossile utilisée à grande échelle pour produire de l'énergie mécanique au début du 19<sup>e</sup> siècle. C'est la maîtrise de cette énergie qui a lancé le développement économique des pays occidentaux dès que les thermodynamiciens de ce 19<sup>e</sup> siècle ont montré comment transformer la chaleur en travail pour l'industrie naissante avec les machines à vapeur, et pour les transports par chemin de fer avec les locomotives à vapeur.

Utilisé maintenant depuis 200 ans, le charbon s'est trouvé dans les cent dernières années en compétition avec le pétrole pour les transports, mais dans la même période le développement de l'électricité renforçait son rôle, la grande majorité des centrales électriques de l'époque fonctionnant au charbon. Il a ensuite rencontré dans les cinquante dernières années un nouveau concurrent avec le gaz naturel dans tous ses usages, centrales électriques aussi bien que chauffage domestique.

Au début de ce 21<sup>e</sup> siècle, la plupart des mines des pays ayant participé aux débuts de l'ère industrielle dans les pays européens sont épuisées ; la plupart des centrales électriques récemment construites dans les pays occidentaux sont au gaz naturel, et les récentes préoccupations liées au réchauffement planétaire, conséquence d'une consommation excessive de combustibles fossiles émetteurs de gaz à effet de serre, marquent le charbon d'une image de combustible polluant, désuet et sans avenir.

Pourtant si elle a régressé en pourcentage de l'approvisionnement mondial en énergie primaire, la consommation de charbon n'a jamais cessé de progresser. D'autres facteurs peuvent contribuer à maintenir, voire développer l'industrie charbonnière, et on peut lire dans quelques papiers

récents que le 21<sup>e</sup> siècle sera le siècle du charbon. Sur quelles bases justifier une hypothèse aussi surprenante et réfléchir aux évolutions intermédiaires qui sont les plus probables? Cette récente position résulte de la convergence de quelques considérations :

- la raréfaction prochaine des deux autres sources d'énergie fossile, pétrole d'abord, puis gaz naturel, et le manque de sécurité d'approvisionnement de ces deux énergies dont les sources se situent dans les zones les plus politiquement instables de la planète. Le charbon, au contraire, se trouve dans de nombreux pays plus stables, ses réserves ne posent pas de problème à l'échelle du siècle et son prix d'extraction est faible.

- les pays les plus peuplés et dont on attend le plus fort développement (Chine et Inde) possèdent de grandes réserves de charbon, qu'ils utiliseront inévitablement pour assurer leur développement. Les Etats-Unis eux-mêmes, dont l'épuisement des réserves de pétrole et de gaz n'est pas si lointain, possèdent beaucoup de charbon qu'ils souhaiteront utiliser.

Cette situation allant à l'encontre du souci écologique de protection de la planète vis-à-vis de l'effet de serre, ceux qui écrivent que le 21<sup>e</sup> siècle sera le siècle du charbon y ajoutent un acte de foi technologique, qui est de parvenir à capturer et séquestrer le CO<sub>2</sub> émis par la combustion du charbon dans des conditions économiques et environnementales acceptables.

L'objectif de ce dossier est de répondre à quelques-unes des questions que peut se poser le public face à cette situation qu'il ignore généralement. Les premières questions appellent des réponses décrivant fidèlement la situation actuelle ; les réponses aux dernières questions permettent de progresser vers une vision de ce que pourrait être le rôle du charbon au cours du 21<sup>e</sup> siècle.

## "10 QUESTIONS SUR LE CHARBON"

1. **Quels sont les usages principaux du charbon ?**
2. **Comment évolue la part du charbon dans la consommation mondiale d'énergie ?**
3. **Comment se situent les réserves en charbon dans le monde, comparées à celles du pétrole et du gaz ? Que reste-t-il comme charbon dans les pays de l'Union européenne ?**
4. **Quels sont les caractères du marché mondial du charbon comparés à ceux du pétrole et du gaz? part du charbon international, coût des transports terrestre et maritime ?**
5. **Pourquoi le charbon a-t-il si mauvaise réputation environnementale ?**
6. **Quel est le coût interne du kWh produit par une centrale à charbon ?**
7. **Quel en est le coût externe résultant de sa pollution de l'environnement ?**
8. **Dans quelle mesure les défauts du charbon peuvent-ils être réduits par la technologie aux horizons 2020, 2040, 2060 ?**
9. **Comment peut-on transformer le charbon en pétrole et à quel coût, afin d'étendre son rôle aux transports modernes ?**
10. **"Le 21<sup>e</sup> siècle sera le siècle du charbon", peut-on lire dans certains documents. Que penser de cette opinion? Quelles sont les chances de séquestrer le CO<sub>2</sub> ?**

## 1. Quels sont les usages principaux du charbon ?

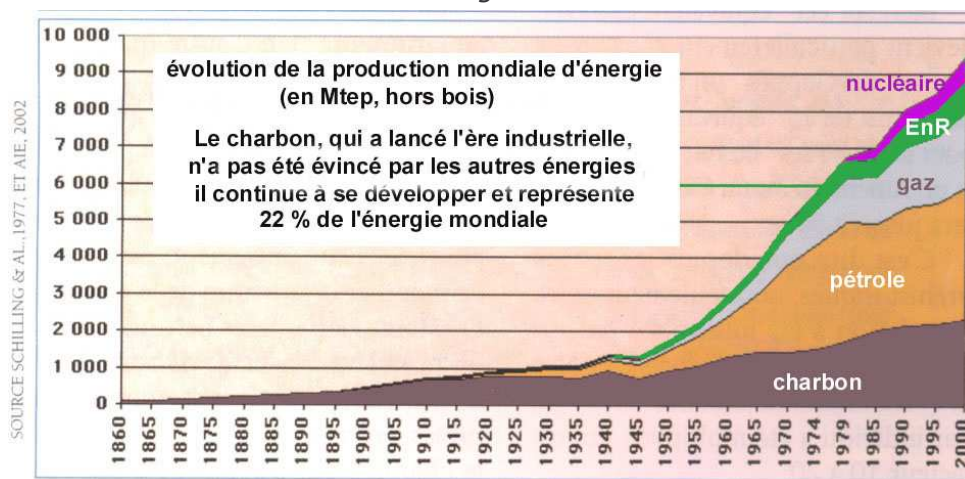
Le premier usage du charbon est, de très loin, la production d'électricité par les grandes centrales thermiques (aux Etats-Unis plus de 90%, produisant 52% de l'électricité ; en Europe 70%, produisant 68% de l'électricité). Les autres usages industriels concernent principalement la métallurgie (une tonne d'acier demande 600 kg de charbon). Dans les usages où seule la chaleur est recherchée et non pas ses propriétés physico-chimiques, il est de plus en plus remplacé par le gaz naturel. Quant à l'usage domestique pour le chauffage de l'habitat, qui était un des plus répandus et des plus polluants (smog de Londres), il a maintenant pratiquement disparu dans les pays développés et ne subsiste que dans les pays en voie de développement disposant de ressources charbonnières (Chine).

La croissance de l'usage du charbon est donc fortement liée à la croissance de la consommation électrique, qui est la plus rapide de toutes les formes d'énergie. Mais la nuisance écologique du charbon constitue un frein à son développement tant que des solutions technologiques ne sont pas mises au point pour le rendre plus "propre", tout particulièrement en ce qui concerne les émissions de dioxyde de carbone participant à l'effet de serre.

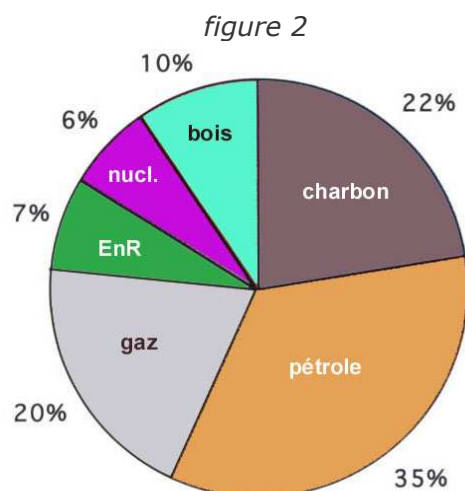
## 2. Comment évolue la part du charbon dans la consommation mondiale d'énergie ?

L'histoire de la participation du charbon dans la production mondiale d'énergie apparaît clairement sur la figure 1.

figure 1



Sa part relative mondiale par rapport aux autres sources d'énergie en 2000 est montrée sur la figure 2. Le charbon y représente encore plus de 1/5 de l'ensemble des sources d'énergie.



### 3. Comment se situent les réserves en charbon dans le monde, comparées à celles du pétrole et du gaz ? Que reste-t-il comme charbon dans les pays de l'Union européenne ?

Il est connu que les réserves de charbon sont les plus importantes ( $\sim 2/3$ ) parmi les réserves de combustibles fossiles, dont les formes les plus pratiques (pétrole et gaz) sont en voie de raréfaction au cours du siècle.

Les valeurs de ces réserves sont rappelées sur le tableau 1.

tableau 1

	Réserves en 2000 (Gtep)	Consommation annuelle en 2000 (Mtep)	réserves Années à consommation constante	Croissance annuelle moyenne de 1970 à 2000	Années de consommation en prolongeant la croissance
Charbon	510	2 355	<b>216</b>	1,60%	<b>93</b>
Pétrole	165	3 604	<b>45</b>	1,39%	<b>34</b>
Gaz	140	2 085	<b>67</b>	3%	<b>37</b>
Total fossile	815	8 044	<b>101</b>	1,80%	<b>58</b>

SOURCE BP STATISTICAL REVIEW, 2002

repris de J-M Jancovici La jaune et le rouge août-septembre 2004

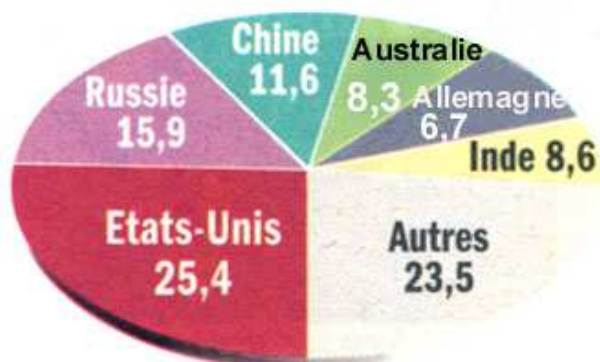
On y voit que l'épuisement des réserves de charbon n'est pas une préoccupation pour le siècle actuel, contrairement aux réserves de pétrole et de gaz, dont les dates se situent vers le milieu du siècle, en se rapprochant l'une de l'autre par la consommation actuellement accélérée de gaz naturel.

La comparaison serait encore plus contrastée ( $\sim 3/4$  de 3600 Gtep) si on se rapportait aux ressources qui ne sont pas classées dans la catégorie des réserves (celles-ci doivent être délimitées par des travaux coûteux) car les mineurs de charbon n'ont aucune raison d'explorer des gisements qui ne seront pas mis en exploitation avant longtemps.



Cette réserve de charbon est répartie sur la planète de manière beaucoup plus homogène que celles de pétrole et de gaz, et ne crée pas de risque géopolitique (fig. 3). Parmi les pays développés, on doit noter que le Japon et l'Europe sont très mal pourvus, le charbon européen ayant été exploité depuis les débuts de l'ère industrielle.

figure 3



source : Courrier International septembre 2004

En Europe, les réserves (ou ressources prétendues telles mais qui seraient pour la plupart à déclasser) sont encore déclarées de 72 Gt, disponibles à un coût élevé d'extraction. La dépendance du charbon importé est de l'ordre de 40% et devrait être comprise entre 80 et 100% vers 2020. La plus grande partie de ces réserves, situées en Allemagne et Europe centrale, est constituée de lignite (brown coal) de moindre qualité, non transportable et brûlé sur mines.

#### **4. Quels sont les caractères du marché mondial du charbon comparés à ceux du pétrole et du gaz ? part du charbon international, coût des transports terrestre et maritime ?**

La plus grande partie de la production charbonnière mondiale est consommée localement dans le pays d'origine et même le plus souvent dans la région d'extraction. Ce marché local ne reflète pas le marché mondial de l'énergie, il en est déconnecté par les coûts d'acheminement, les contraintes, les limites du choix des consommateurs, les subventions publiques.

Le marché sur lequel il existe une compétition est principalement celui des grandes centrales électriques alimentées par du charbon "mondial", fraction de la production mondiale qui est souvent transportée à grande distance et fait l'objet de contrats alignés sur une cote internationale. Ce charbon mis sur le marché international (moins de 20% de la production mondiale) provient essentiellement de mines proches de la mer (Australie, Colombie, Indonésie, Venezuela), le transport par mer étant dix fois moins cher que le transport terrestre, tout en restant une composante



importante du coût. En Chine, le transport par rail du charbon mobilise exagérément le système ferroviaire.

Le charbon ne subit pas de transformations entre son extraction et son utilisation, contrairement aux produits pétroliers qui subissent des opérations de raffinage qui ont pour objet de mettre sur le marché une gamme diversifiée de produits standards n'existant pas pour le charbon. Il n'est pas taxé comme ces produits pétroliers qui ont un quasi-monopole sur le segment de marché des transports et sont souvent fortement taxés.

Le prix moyen du charbon "vapeur" (destiné à produire de la vapeur pour les centrales ou les usages thermiques de process) consommé sur mine aux Etats-Unis était en 2000 de 30 à 50 \$/t. Importé en Europe, il revenait à environ 50/60 \$/t. Mais l'envolée actuelle des prix du pétrole et du gaz et leurs incertitudes géopolitiques commencent à tirer vers le haut les cours du charbon aux Etats-Unis où il vient de doubler en 2 ans (fig. 4), les Etats-Unis réactivant cette source d'énergie avec 92 nouvelles centrales thermiques en projet représentant 60 GW.

figure 4



Le charbon a eu dans les dernières décennies deux fonctions sur la scène énergétique : d'une part, il intervient dans le processus de développement de pays comme la Chine et l'Inde, comme il est intervenu dans le passé en Europe ; d'autre part il constitue le terme de bouclage de la consommation énergétique mondiale et il est, de ce fait, un modérateur du marché énergétique mondialisé.

Les Etats-Unis sont bien placés, leur exportation ne représentant que moins de 10% de leur importante production assurée par des milliers de mines, ce qui leur permet d'accroître leurs exportations dans des délais très courts. Les États-Unis jouissent d'un avantage de coût de transport vers l'Europe par rapport à l'Australie ou l'Indonésie, et leur façade sur l'océan pacifique leur permet également d'exporter vers l'Asie les charbons de l'ouest américain.

## 5. Pourquoi le charbon a-t-il si mauvaise réputation environnementale ?

Les inconvénients du charbon sont bien connus. C'est le plus polluant des combustibles fossiles par les émissions résultant de sa **combustion** :

- *dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>)*, facteur de pluies acides, et *oxydes d'azote (NOx)*,
- *CO<sub>2</sub> (gaz à effet de serre)* issu de la combustion du carbone et des composants organiques contenus dans le charbon. Le charbon génère 30% des émissions anthropiques de CO<sub>2</sub> dans le monde.
- *hydrocarbures* qui conduisent notamment à la formation de composés organiques volatils et d'hydrocarbures aromatiques polycycliques, dont certains sont toxiques.
- *composés halogénés* dont une fraction importante sous forme gazeuse.
- *cendres*, dont cendres volantes très fines (90%) potentiellement préjudiciables à la santé.
- *métaux lourds* présents dans ces cendres, volatilisés et/ou concentrés. Le *mercure* fait l'objet d'une attention grandissante aux États-Unis.

En outre, lors de l'**extraction** du charbon, le méthane (grisou) des mines est un autre gaz créateur d'un effet de serre une vingtaine de fois plus fort que le CO<sub>2</sub> à teneur égale.

Au total, de par son extraction et sa combustion, le charbon est responsable du plus grand impact sur la santé publique parmi tous les combustibles fossiles (accidents de mines, silicose, maladies pulmonaires et autres liées aux émissions). Ses dégâts cumulés depuis deux siècles sur la santé publique se chiffrent en centaines de milliers de morts qui ont été considérés comme un tribut payé au développement économique. Encore actuellement, malgré des progrès considérables déjà réalisés, plusieurs milliers de morts par an lui sont imputables.

Les emplois souvent archaïques qui en ont été faits jusqu'à présent (chauffage individuel) tombent en désuétude, et il doit s'adapter à la sévérité croissante des réglementations environnementales.

## 6. Quel est le coût interne du kWh produit par une centrale à charbon ?

Si on prend comme base le type de centrale le plus répandu depuis 40 ans (à charbon pulvérisé avec traitement des fumées), qui est une technologie maîtrisée permettant des puissances unitaires allant jusqu'à environ 1000MW, le coût de production pour une unité typique de 600MW et de rendement 45% se situe entre 33 et 40 €/MWh, suivant la qualité du charbon et le cours du dollar. Aux États-Unis le coût moyen se situe entre 33 et 41 \$/MWh<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Selon Ken Silverstein, Director Energy Industry Analysis, Université de Chicago, 21 septembre 2004.

Ces valeurs sont à comparer à des coûts de l'ordre de :

- 28 à 43 €/MWh pour une centrale thermique à gaz à cycle combiné, suivant le prix du gaz et le cours du dollar, avec un meilleur rendement de 58% (35 à 45 \$/MWh aux Etats-Unis<sup>2</sup>) ;
- ~30 €/MWh pour les centrales nucléaires françaises (31 à 46 \$/MWh aux Etats-Unis<sup>2</sup>).

Les variantes de la filières qui apportent des améliorations de rendement et/ou de dépollution se situent autour des valeurs moyennes citées plus haut :

- environ - 7,5% pour la technologie "lit fluidisé circulant" (qui élimine les SOx et NOx en amont),
- environ + 25% pour la technologie IGCC (*integrated gazification combined cycle*, qui porte l'espoir d'une capture plus facile du CO<sub>2</sub>).

## **7. Quel en est le coût externe résultant de sa pollution de l'environnement ?**

Le coût des dispositifs requis pour respecter la réglementation environnementale actuelle est inclus dans les coûts internes cités.

Si dans les années à venir une mise en application mondiale (ou seulement européenne) du protocole de Kyoto voit le jour, et si une pénalisation des émissions de gaz à effet de serre est mise en place, un coût externe viendra s'ajouter aux coûts internes cités au § 6. Selon les pays et les auteurs, les estimations de cette pénalisation future se situent dans une fourchette assez large, entre 50 et 200 €/tC, et peuvent conduire à un coût externe du même ordre de grandeur que le coût interne.

Ce coût externe pénaliserait lourdement la production d'énergie électrique à partir du charbon, au risque de l'évincer et devra alors être comparé au coût d'une éventuelle capture du CO<sub>2</sub> en cours de développement, suivie de séquestration souterraine (voir §10).

## **8. Dans quelle mesure les défauts du charbon peuvent-ils être réduits par la technologie aux horizons 2020, 2050 ?**

L'attrait du charbon comme ressource indépendante et bon marché pour les pays qui en disposent, la simplicité des installations portuaires de chargement/déchargement et des bateaux minéraliers (contrairement au gaz), l'absence de risque de pollution maritime (contrairement au pétrole), l'absence de risque géopolitique et de cartel de contrôle comme l'OPEP, tous ces facteurs sont à mettre à son crédit et en balance avec ses inconvénients. Ils constituent une forte motivation pour améliorer la

"propreté" du charbon par une grande diversité de moyens technologiques, certains déjà en application, d'autres au stade de la recherche et du développement.

Diverses technologies actuelles permettent déjà d'éliminer une part substantielle des SO<sub>x</sub> et des NO<sub>x</sub>, soit en aval de la combustion (traitement des fumées), soit en amont (lit fluidisé circulant), ainsi que des poussières par filtrage électrostatique des fumées.

### **En ce qui concerne la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>, plusieurs améliorations sont en cours :**

**8.1. Modernisation par augmentation du rendement** (permettant d'émettre moins de CO<sub>2</sub> par kWh produit), par une augmentation de la température de vapeur améliorant le rendement du cycle thermodynamique de Carnot. C'est l'amélioration la plus proche, car le rendement moyen du parc mondial de centrales thermiques n'est que de 32% (en Europe 38%, rejetant 0,3 tC/MWh), alors que les technologies déjà développées du charbon pulvérisé en cycle supercritique à 580°C/280b permettent d'atteindre un rendement de 40 à 45%. Cette réhabilitation de certaines centrales permettra aux pays comme l'Allemagne dont le charbon représente une part importante dans leur bouquet énergétique de respecter une partie de leurs engagements de Kyoto 1. Pour aller au-delà par cette voie du rendement, il est envisagé de passer vers 2015/2020 en cycle thermodynamique "ultrasupercritique" à 720°C/350b, ce qui permettrait de porter le rendement à 50%, en rejetant seulement 0,2 tC/MWh. Ce second stade de réhabilitation, conjugué avec une large part réservée au gaz dans les nouvelles centrales, permettra d'aller au-delà dans la voie de Kyoto.

Au cours des trente prochaines années, le charbon devrait achever sa modernisation : fermeture des exploitations peu productives, concentration sur les productions les plus efficaces compte tenu des frais d'acheminement, utilisation dans des installations propres, notamment des centrales électriques à rendement beaucoup plus élevé qu'actuellement et n'émettant que des quantités minimales de polluants hors CO<sub>2</sub>.

**8.2. Des filières attaquant plus directement la capture du CO<sub>2</sub> en vue de sa séquestration.** Pour toutes ces nouvelles filières en cours de développement, beaucoup de développement reste à faire car leur économie est encore loin d'être assurée. Leur apparition à grande échelle sur le marché ne semble pas prévisible avant 2020.

Elles sont toutes énergivores et réduisent donc le rendement de la centrale, et sont encore loin d'atteindre la compétitivité économique.

L'efficacité de la capture est à préciser pour chacune d'elles.

On y distingue des procédés aval par capture du CO<sub>2</sub> dans les fumées (par dissolution du CO<sub>2</sub> dans des amines, ou par membranes filtrantes, ou par réfrigération, ou par adsorption par un solide), et des procédés amont, avant ou pendant la combustion :

- la combustion à l'oxygène facilitant la capture du CO<sub>2</sub> par sa plus forte concentration dans les fumées, due à l'absence d'azote. Plusieurs sous-filières s'y rattachent, soit à partir d'un générateur d'oxygène cryogénique ou à membrane.
- Le "*chemical looping*" où l'oxygène est apporté par un oxyde métallique solide circulant en boucle. Après sa réduction, il retourne se faire oxyder par l'air dans un cycle d'oxydation-réduction régénératif. Les gaz de sortie ne contiennent que du CO<sub>2</sub> et de l'eau dont la séparation est aisée. Ce procédé n'est pour le moment en développement que pour des centrales à gaz naturel ; il pose beaucoup de problèmes pour son adaptation à un solide comme le charbon.
- La co-combustion de charbon et de biomasse, réputée neutre en émission de CO<sub>2</sub>, réduisant l'émission globale. Cette filière est limitée par la disponibilité et le transport de la biomasse (déchets de bois, dérivés agricoles ou de résidus urbains...).
- L'IGCC, où une gazéification à l'oxygène sous pression du charbon est intégrée à un cycle combiné. Le gaz de synthèse comprimé sans azote (CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, COS) alimente après épuration un cycle combiné à gaz et peut y être plus facilement décarboné. Ce projet permettrait également la production d'hydrogène et/ou de carburant de synthèse. Cette filière très sponsorisée par les Etats-Unis offre un concept performant sur le plan environnemental, une ouverture pour la capture du CO<sub>2</sub> dans le gaz de synthèse, une synergie possible (tri-génération d'hydrogène, de chaleur et d'électricité), mais pour l'instant reste un système complexe de manœuvrabilité réduite, de rendement discutable et de coût excessif.

**8.3. On doit souligner que cette capture du CO<sub>2</sub> n'aura d'intérêt qu'en cas de succès de sa séquestration (voir §10).**

## **9. Comment peut-on transformer le charbon en pétrole et à quel coût, afin d'étendre son rôle aux transports modernes ?**

La transformation de charbon en pétrole (*coal to liquid CTL*) est un procédé connu depuis 1923 (Fischer-Tropsch). C'est une transformation catalytique du gaz de synthèse (CO + H<sub>2</sub>) obtenu à partir du charbon, en hydrocarbures paraffiniques et oléfiniques, et, à un moindre degré, en composés oxygénés divers (alcools, aldéhydes, cétones, etc.).

Développé industriellement entre 1923 et 1935, il a permis d'approvisionner le III<sup>e</sup> Reich en hydrocarbures. Au début de la Seconde Guerre mondiale, neuf usines allemandes produisaient 750 000 tonnes de pétrole par an; la capacité mondiale étant alors de 1 million de tonnes par

an. Après la guerre, toutes ces unités furent progressivement arrêtées.

Cette opération devient rentable pour un cours du pétrole se maintenant durablement au-dessus de 40\$/bl. En Afrique du Sud, SASOL produit actuellement à partir du charbon du pétrole (pour les 2/3) et du gaz (pour 1/3). La Chine riche en charbon s'intéresse vivement au procédé CTL.

On doit souligner que la transformation du charbon en pétrole ne modifie pas le problème écologique de l'émission de CO<sub>2</sub> posé par la combustion de cette ressource fossile, transformée ou non.

### **10. "Le 21<sup>e</sup> siècle sera le siècle du charbon", peut-on lire dans certains documents. Que penser de cette opinion ? Quelles sont les chances de pouvoir séquestrer le CO<sub>2</sub> ?**

Dans une évolution mondiale marquée dans les trente prochaines années par de fortes économies d'énergie et par la progression du gaz naturel, il est possible que, contrairement à une évolution séculaire, la consommation mondiale de charbon cesse alors de progresser ou qu'elle fléchisse. Mais la mise au point économique et le développement à grande échelle de la séquestration du CO<sub>2</sub> issu des plus puissantes installations consommatrices de charbon pourrait renverser la situation au point de vue de l'environnement : le charbon ainsi utilisé deviendrait un combustible propre, et les progrès réalisés dans son domaine compenseraient le fait que les hydrocarbures (qui ont un avantage technico-économique spécifique dans les emplois dispersés : transports, usages ruraux dans les pays en développement) continueraient à émettre, de façon sans doute croissante, du CO<sub>2</sub>. Le charbon, après avoir permis l'essor industriel du XIX<sup>e</sup> siècle et de la première moitié du XX<sup>e</sup>, puis constitué depuis plus de cinquante ans un terme de bouclage régulateur du marché énergétique mondial soumis aux chocs et contrechocs pétroliers, pourrait alors participer à l'amélioration du bilan des émissions de gaz à effet de serre.

Aujourd'hui, cet espoir est tempéré par quelques questions encore non résolues :

- L'acceptation sociale de la séquestration du CO<sub>2</sub> : les coûts de séquestration apparaissent relativement modestes dans la chaîne "capture, transport, séquestration", de l'ordre de 20 à 40 €/tC mais comme pour tous les stockages de déchets à risque (nucléaires, chimiques,...), la forte opposition des ONG et des "verts" rend suspect ce mode de stockage au regard du public. Les conventions internationales sur la mer sont actuellement un frein à l'utilisation des aquifères salins.
- Les coûts de capture sont encore trop élevés, de l'ordre de 60 à 70 €/tC, bien que ceux-ci évoluent rapidement (réduits de moitié depuis les premières usines prototypes), l'efficacité de la capture reste



également à préciser, un ordre de grandeur du pourcentage de CO<sub>2</sub> capturé de 90 % est cité.

On peut penser que dans les trente prochaines années des solutions seront trouvées à ces questions et lorsque le prix des hydrocarbures et de l'électricité auront intégré la nouvelle donne marquée par la raréfaction des réserves d'hydrocarbures conventionnels, et par l'internalisation des coûts de réduction des émissions de dioxyde de carbone, le charbon pourrait être appelé, comme sans doute le nucléaire, à mieux intervenir dans le bouclage du bilan des énergies et des émissions.

Ceci ne signifierait pas que sa consommation prendrait un essor rapide, car les effets des efforts d'économie d'énergie se prolongeront au-delà de deux ou trois décennies par la lenteur relative de leur diffusion et leur potentiel restera dans vingt ans encore largement inexploité. Mais cette vision purement quantitative de la filière du charbon n'est pas essentielle car elle masque une évolution structurelle plus décisive : la structure de la filière charbon a été jusqu'à présent, de type primitif, avec des coûts d'extraction relativement importants (y compris en vies humaines, ce qui devient inacceptable aujourd'hui), des coûts de transport lourds, des méthodes de distribution rustiques et une utilisation sans trop de précaution entraînant des coûts collectifs (écologiques) devenus également inacceptables. La concentration et les techniques de consommation incluant des transformations d'état (gazéification), des productions combinées (électricité, hydrogène, chimie) et la capture-séquestration, donneront à la filière charbon une toute autre structure, se rapprochant de celles des futures filières hydrocarbures, nucléaires et énergies nouvelles. Il serait aberrant de considérer qu'une telle mutation de la scène énergétique ne s'appliquera pas au charbon.

Le décalage d'évolution tient au fait que l'industrie charbonnière mondiale est restée jusqu'à ces derniers temps tributaire de conceptions anciennes qui sauvegardaient des avantages sociaux que les autorités publiques ont généralement préservés par des subventions en Europe ; le développement massif des productions artisanales chinoises des années 70 à 90 a été le dernier et spectaculaire avatar de ces anciennes structures. Cette industrie n'a pas encore été animée par de puissants groupes producteurs intégrés, motivés pour investir massivement en anticipation.

L'action combinée du renchérissement des hydrocarbures dû à leur raréfaction et de la prise en compte des coûts collectifs (taxe ou marché carbone) produira cette mutation, n'en doutons pas, et les producteurs et constructeurs, placés dans une économie concurrentielle mondialisée, ne peuvent se permettre d'anticiper autrement que par des recherches soutenues par les pouvoirs publics.



En Europe, malgré des ressources charbonnières presque épuisées, l'industrie ne peut être placée hors jeu du secteur charbon car :

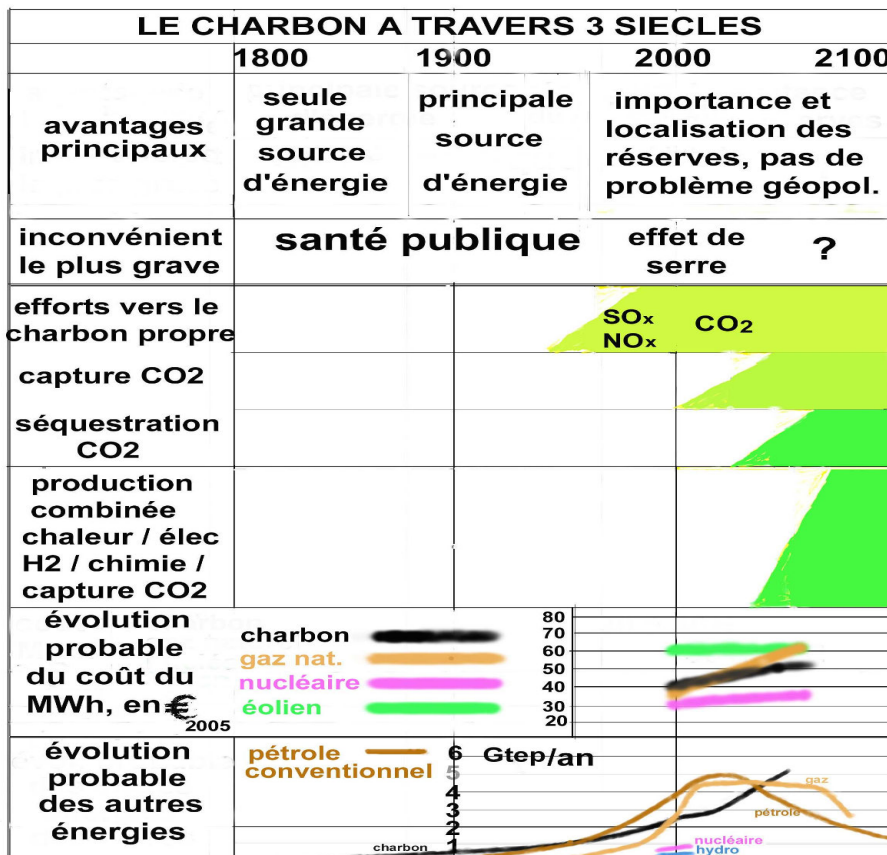
- d'une part, tout un pan de la partie mondiale qui se jouera sur l'énergie lui échapperait et elle se mettrait en position de faiblesse dans le domaine des systèmes de génération combinée (chaleur, électricité, hydrogène, chimie, capture de CO<sub>2</sub>), qui s'imposeront dans quelques décennies ;
- d'autre part, les pays européens abandonneraient un facteur de sécurité d'approvisionnement énergétique qui a été essentiel dans le passé et que rien ne permet de considérer comme caduc pour l'avenir.

Le tableau 2 regroupe quelques messages contenus dans les réponses à ces 10 questions.

**Pour en savoir plus :** Pour ceux qui ont accès à l'extranet privé de l'Académie des technologies (SICAT), lire, par "dossier énergie-environnement", dans la rubrique "fossile charbon" :

- rapport du GT "charbon, quel avenir",
- résumé du rapport "charbon, quel avenir",
- l'annexe 1 : Impact des réglementations environnementales sur l'avenir du charbon,
- l'annexe 2 : Les technologies du charbon.

tableau 2



## GLOSSAIRE ET UNITÉS

b = bar, unité de pression

bl = baril (unité de volume des pétroliers)

CO<sub>2</sub> = dioxyde de carbone, principal gaz à effet de serre (environ 2/3 de l'effet de serre)

Gt = Gigatonne = 1 milliard de tonnes

IGCC (*Integrated Gasification Combined Cycle*) cycle combiné à gazéification intégrée

MW = Mégawatt = 1 million de watts, 1 MWh = 1 Mégawatt × 1 heure

NO<sub>x</sub> = oxydes d'azote

SO<sub>x</sub> = oxydes de soufre

ta = tonne américaine = 907 kg (unité encore utilisée pour le charbon aux Etats-Unis)

tCO<sub>2</sub> = tonne de CO<sub>2</sub>

tC = tonne de carbone rejeté contenu dans le CO<sub>2</sub> = 12/(12+2×16), soit 0,273 tCO<sub>2</sub>

tep = tonne d'équivalent pétrole, Gtep = Gigatonne d'équivalent pétrole