

## Les dangers du charbon (autres que l'effet de serre)

*«Nous ne voulons pas faire entendre par-là qu'on exagère l'importance des grands sinistres. Non, au contraire, mais aux nombreux petits accidents, qui, chaque année, font des centaines de victimes parmi les mineurs, on ne fait presque pas attention ou, en tout cas, on attache beaucoup trop peu d'importance. L'esprit public est ainsi fait, qu'il s'apitoie aisément sur cent hommes frappés ensemble par un cataclysme sensationnel et pas du tout sur le même nombre atteint en détail ». Georges de Launay (1)*

### Résumé

*Les dangers entraînés par l'usage du charbon comme source d'énergie sont très importants, multiformes, et présents à toutes les étapes de la filière, de l'extraction à l'utilisation.*

*Mais fautes d'études à l'échelle mondiale bien plus détaillées que les études actuelles, on ne peut pour l'instant donner que des ordres de grandeurs des ravages ainsi provoqués.*

*Ces ravages commencent par les graves atteintes à l'environnement que provoque son extraction dans les grands pays producteurs, en particulier quand les exploitations se font à ciel ouvert. Les surfaces concernées sont considérables: pour ne parler que des pays européens, rien qu'en Allemagne 1500 km<sup>2</sup> environ ont déjà été bouleversés pour y exploiter le lignite, et 10 000 km<sup>2</sup> seront menacés dans l'avenir. Plus de 100 000 personnes ont été déplacées et leurs habitations détruites.*

*Les déchets, tant des exploitations, sous forme de stériles et de boues de lavage, que de la combustion du charbon, sous forme de cendres en provenance plus particulièrement des centrales électriques, se comptent à l'échelle mondiale en milliards de m<sup>3</sup> par an. Leur stockage se fait dans des conditions trop souvent précaires.*

*Il est impossible pour l'instant d'évaluer la mortalité et la morbidité qui résultent dans les populations riveraines de ces atteintes à l'environnement, parce qu'il n'y a que très peu d'études épidémiologiques approfondies à ce sujet. Mais il existe dans certains cas des évidences de maladies qui y sont liées.*

*Les accidents dans les mines provoquent chaque année dans le monde la mort de 10 000 à 20 000 mineurs, ce qui est énorme par rapport à la mortalité provoquée par l'exploitation des autres sources d'énergie.*

*Cependant, contrairement à une idée fort répandue, la mortalité la plus importante dans les mines n'est pas celle due à ces accidents, mais celle due aux maladies professionnelles : A l'échelle mondiale, elle est de l'ordre de 500 000 morts chaque année, principalement à cause de la prévalence d'une*

*très grave maladie pulmonaire, la silicose, due aux très fines poussières de silice en suspension dans l'atmosphère des mines.*

*Une deuxième très grande source de mortalité est due à l'utilisation domestique du charbon en espace confiné pour le chauffage et la cuisine, surtout dans les pays en voie de développement et émergents. Elle touche surtout les femmes et les enfants et est à peu près aussi importante que celle due aux maladies professionnelles. Elle est due principalement aux particules très fines contenues dans les fumées et à l'oxyde de carbone produit par des combustions en déficit d'oxygène, mais aussi à des composés organiques dangereux présents dans les fumées, tels que les hydrocarbures polycycliques aromatiques (HAP), et dans certains cas à des contaminations de l'alimentation par des polluants minéraux contenus dans le charbon, tels l'arsenic, le fluor, le sélénium ou le thallium.*

*La troisième et la plus grande source de mortalité est la pollution atmosphérique émise par les industries utilisatrices de charbon, au premier rang desquelles la production d'électricité. Elle provoquerait, selon les modélisations actuelles, de l'ordre du million de morts chaque année dans le monde. Les coupables sont surtout les particules extrêmement fines, de taille inférieures à 10  $\mu$  (PM<sub>10</sub>), contenues dans les cendres volantes (fly ash), qui peuvent pénétrer au plus profond des poumons et peut-être même dans la circulation sanguine.*

*Avec un ordre de grandeur de 1 à 2 millions de morts chaque année dans le monde, peut-être plus, et un nombre bien plus considérable encore de malades gravement atteints, le charbon est donc la plus dangereuse de toutes les énergies utilisées par l'homme, et cela de très loin. C'est en fait, avec une prévalence de l'ordre de grandeur de celle du paludisme, une des principales causes de mortalité dans le monde. C'est aussi l'énergie dont on sait qu'elle contribue le plus à l'augmentation de l'effet de serre additionnel, par les émissions de CO<sub>2</sub>, mais aussi de méthane, qu'entraîne son utilisation. C'est pourtant l'énergie dont la croissance est la plus importante actuellement, parce qu'elle est de plus en plus utilisée par les pays émergents très peuplés à développement rapide, en premier lieu la Chine et l'Inde, mais aussi par de grands pays industriels.*

*Tous les pays ne sont pas égaux devant ces dangers: la Chine est de loin le pays le plus touché, car son développement actuel repose sur une consommation de charbon croissant à marche forcée, comme dans les pays européens au cours de leur Révolution Industrielle, avec des précautions qui ont été longtemps très insuffisantes tant pour l'extraction du charbon que pour son utilisation, et corrélativement peu de considération pour la vie humaine. Dans les campagnes chinoises, le charbon est aussi très utilisé pour le chauffage et la cuisine, et cela en atmosphère confinée. Plus de la moitié de*

*la mortalité mondiale due au charbon seraient ainsi le fait de la Chine. L'Inde n'est guère mieux lotie. L'Ukraine et la Russie ont encore de très grands progrès à faire. Dans tous ces pays cependant, une prise de conscience a déjà eu lieu ou est en train de se faire et des améliorations substantielles sont en cours.*

*Les citoyens de l'Europe se croient à l'abri, car dans leur inconscient collectif est ancrée l'idée que seuls les accidents dans les mines représentent un danger. Très égoïstement, ils pensent que c'est exclusivement l'affaire des ouvriers mineurs, surtout ceux de pays lointains car la sécurité dans les mines européennes s'est considérablement améliorée depuis les débuts de la Révolution Industrielle. Ils ne se sentent donc pas directement concernés. Ce en quoi ils ont tort: les atteintes à l'environnement dues à l'extraction du charbon et au stockage de déchets sont très importantes. Les plus spectaculaires sont en Europe Centrale et de l'Est, en particulier dans les pays où l'on utilise beaucoup le lignite, Allemagne, Pologne et Pays des Balkans principalement.*

*D'autre part, si la mortalité dans les mines est en Europe bien plus faible qu'en Chine, et si le charbon n'y est plus guère utilisé pour le chauffage et la cuisine, la mortalité due à la pollution atmosphérique par les installations industrielles utilisatrices de charbon, en particulier les centrales électriques, reste importante : Les estimations actuelles pour l'Europe des 27 sont d'environ 30 000 morts prématurées par an, dont 10 000 en Allemagne et 1000 en France, et de 10 fois plus pour la prévalence des maladies graves.*

*En Europe comme ailleurs, le charbon est donc de loin la plus dangereuse des sources d'énergie, même si elle l'est beaucoup moins qu'en Chine. C'est d'autant plus regrettable que, à défaut de vouloir remplacer les centrales à charbon actuelles par des centrales ne fonctionnant pas au charbon, ce qui serait la meilleure solution, l'accélération de leur remplacement par des centrales modernes, sans supprimer cette mortalité, la diminuerait déjà de beaucoup.*

*Les pressions pour améliorer cette situation sont insuffisantes, et en Europe les médias européens sont étonnamment discrets sur le sujet. Pour avoir une idée plus précise des dégâts provoqués, les études épidémiologiques approfondies autour des centrales à charbon, mais aussi des exploitations et des stockages de déchets et de cendres devraient être systématiques, et leurs résultats devraient être largement diffusés, en particulier en Allemagne et dans les pays de l'Europe Centrale, de l'Europe de l'Est et des Balkans, qui sont les plus concernés. C'est bien loin d'être le cas actuellement.*

**Introduction**

De tous les combustibles carbonés fossiles, le charbon produit lors de sa combustion les plus fortes quantités de CO<sub>2</sub>, pour une même quantité d'énergie produite. En 2008, avec 12,6 Gt de CO<sub>2</sub> émis, il était responsable de 34% des émissions anthropiques de CO<sub>2</sub>, de 43 % des émissions dues aux combustibles fossiles, et de 72 % des émissions dues à la production d'électricité (2). Cela faisait de son utilisation le plus fort contributeur des activités humaines à l'effet de serre additionnel ! Ces proportions ont depuis encore un peu augmenté, du fait de la part grandissante du charbon dans l'approvisionnement énergétique mondial.

C'est à peu près uniquement sur cette base que l'on discute à l'heure actuelle dans les médias français des dangers de l'utilisation du charbon comme source d'énergie.

Ce faisant, il n'est guère expliqué qu'il présente aussi de sérieux dangers pour la santé publique et pour l'environnement, qui ne se limitent pas aux effets des accidents dans les mines. Certes des documentaires télévisés sont parfois présentés à ce sujet pour des pays lointains tels que la Chine, l'Australie ou les Etats-Unis, mais les journalistes sont curieusement quasiment muets sur la situation en Europe, et plus spécifiquement en Allemagne, en Pologne, en Ukraine, en Russie et dans les pays balkaniques, principaux producteurs de charbon Européens.

Cette situation contraste avec celle des Etats-Unis, où le débat est devenu depuis quelques années très vif. On peut alors se demander quelles sont les raisons de la timidité des médias français à pratiquer dans ce domaine un devoir d'information qu'elles revendiquent si fort dans d'autres !

L'objet de cette étude est de recenser ces dangers sanitaires et environnementaux. Elle est aussi d'en apprécier l'importance. Disons tout de suite à ce propos que la documentation existante ne permet que d'établir des ordres de grandeur, car la plus grande partie de la production de charbon a lieu actuellement dans des pays qui sont encore loin de disposer des moyens d'analyse et de suivi sanitaire qui existent maintenant dans les pays développés. Dans ces pays, la situation se compare à celle qui prévalait par exemple en Europe vers le milieu du 19<sup>ème</sup> siècle, quand la production de charbon s'y développait à marche forcée pour alimenter la Révolution Industrielle alors en plein développement, sans considération pour la vie humaine.

Pour autant en Europe, malgré les énormes progrès effectués depuis les débuts de la Révolution Industrielle, la maîtrise des dangers qu'entraîne l'utilisation du charbon est encore un enjeu majeur de santé publique. Et le peu d'intérêt des médias pour le sujet n'encourage guère à l'heure actuelle les efforts dans ce domaine.

## **1- Le charbon, de quoi parle-t-on ?**

Les charbons auxquels nous nous intéressons ici sont les charbons dits «humiques» (3) (en Anglais humic coals) par les naturalistes : Ce sont des roches très riches en matières organiques, formées très lentement dans des bassins sédimentaires au cours des temps géologiques. Elles ont leur origine dans l'accumulation dans certains sédiments de débris organiques principalement issus de végétaux dits supérieurs (arbres et autres plantes ligneuses), dans des régions restées marécageuses pendant de très longues périodes. Il existe d'autres variétés de charbon, par exemple les charbons d'algues (en Anglais algal coals) formés essentiellement à partir de débris d'algues unicellulaires, mais ils représentent quantitativement peu de chose.

Les milieux typiques de dépôt de ces débris végétaux sont des deltas de fleuves situés dans des zones climatiques favorisant une végétation abondante. Un facteur très important du dépôt et de l'accumulation est que ces deltas se trouvent dans des bassins très subsidents, c'est-à-dire dont le substrat rocheux s'approfondit rapidement, à l'échelle géologique s'entend, sous l'effet de la tectonique locale, entretenant ainsi sur des millions d'années une permanence de milieux marécageux sur de vastes étendues. Des analogues modernes sont par exemple les deltas marécageux de certains fleuves indonésiens ou du Grand Nord Canadien.

Les débris végétaux qui s'accumulent dans les vases, provenant de la décomposition des végétaux après leur mort, ou de leurs parties caduques (feuilles, fruits, branchages...), sont à l'abri de l'oxygène de l'air, mais aussi des microorganismes aérobies qui pourraient les consommer. Ils sont fréquemment redistribués ou recouverts par d'autres sédiments issus de l'érosion des continents voisins, à l'occasion de crues ou d'errances des cours d'eau. Des empilements sédimentaires épais parfois de plusieurs kilomètres et contenant un grand nombre de niveaux de sédiments riches en matière organique peuvent ainsi se constituer. L'abondance de ces «séries houillères», en Anglais «coal measures», a été particulièrement grande au Carbonifère et au début du Permien, il y a de cela 350 à 300 millions d'années environ, mais aussi au Tertiaire, ère géologique ayant débuté il y a 65 millions d'années. Les charbons du Tertiaire, dont l'histoire géologique est beaucoup moins longue que pour ceux du Carbonifère, et surtout qui ont le plus souvent été soumis au cours de leur histoire à des températures et des pressions moins importantes du fait d'un enfouissement à des profondeurs en général plus faible, en sont restés pour la plupart au stade du lignite (voir plus loin)

Formellement, on réserve dans ces séries l'appellation de charbon aux roches ayant une teneur en carbone organique de plus de 40 % poids mesurée sur roche sèche. Elles s'y trouvent sous forme de veines dont l'épaisseur varie selon les séries de la dizaine de centimètres à la dizaine de mètres et l'extension latérale

de la centaine de mètres à la dizaine de kilomètres. Elles sont intercalées avec des argiles charbonneuses (schistes charbonneux) contenant une matière organique identique, mais dont la teneur dans les sédiments est plus faible et très variable, et avec des niveaux gréseux, le tout sur des épaisseurs pouvant atteindre plusieurs kilomètres. Plus de 80 % de la matière organique se trouve en réalité dans la masse considérable des argiles charbonneuses et non dans les charbons proprement dits. Notons que ces caractères confèrent à beaucoup de ces séries houillères une forte perméabilité d'ensemble, qui est due à l'abondance des corps gréseux très perméables, aux extensions horizontales assez faibles des barrières imperméables que constituent les argiles charbonneuses, et à l'abondance des failles et des fissures. Cela fait que les mines souterraines de charbon sont envahies dès leur creusement par les eaux de surface, et qu'il faut en permanence pratiquer une **exhaure**, c'est-à-dire renvoyer les eaux d'infiltration dans le réseau hydrographique à l'aide de pompes puissantes. Cela a limité longtemps les possibilités d'exploitation du charbon aux débuts de la Révolution Industrielle, jusqu'à ce que les machines à vapeur fassent des progrès suffisants pour assurer ce pompage avec efficacité jusqu'à des profondeurs importantes. Cela sera aussi un problème en cas d'exploitation de «gaz de schistes » dans ce type de série, ainsi qu'en cas d'exploitation par gazéification souterraine, une partie des gaz exploités ou produits pouvant rapidement se retrouver en surface.

La matière organique contenue dans les charbons est surtout composée de carbone, d'hydrogène et d'oxygène, accessoirement de soufre et d'azote. Elle est intimement associée à des éléments minéraux qui s'y trouvent soit sous forme organo-minérale, soit sous forme de minéraux exprimés, par exemple la pyrite (FeS<sub>2</sub>), sulfure de fer où le fer est souvent partiellement remplacé par une foule d'autres éléments, ou la blende (sphalérite) (ZnS) sulfure de zinc qui contient souvent un peu de cadmium. Comme dans toute roche sédimentaire, ces éléments minéraux se trouvent en grand nombre, en fait pratiquement toute la table de Mendéleiev. Certains d'entre eux ont des concentrations plus importantes que leur Clarke (4), parfois de beaucoup, et parmi ceux-ci se trouvent des éléments «hasardeux», c'est-à-dire présentant des risques pour la santé humaine sous certaines conditions. Il s'agit en particulier de l'**antimoine**, de l'**arsenic**, du **béryllium**, du **cadmium**, du **chrome**, du **cobalt**, du **fluor**, du **plomb**, du **manganèse**, du **mercure**, du **nickel**, du **sélénium** et du **vanadium** (5).

element	health effects
As	anemia, gastric disturbance, renal symptoms, ulceration; skin and lung carcinogen in humans; a suspected teratogen (birth defects)
Be	respiratory disease and lymphatic, liver, spleen, and kidney effects; an animal and probable human carcinogen
Cd	emphysema and fibrosis of the lung, renal injury, possible cardiovascular effects; an animal and possible human carcinogen; testicular toxicity in mice and rats; teratogenic in rodents
Hg	neural and renal damage, cardiovascular disease; methylmercury is teratogenic in humans
Mn	respiratory and other effects
Ni	dermatitis, intestinal disorders; Ni and nickel oxide dusts are carcinogenic to guinea pigs and rats; nickel refining is associated causally with cancer in humans
Pb	anemia, cardiovascular, neurological, growth retarding, and gastrointestinal effects; some compounds are animal and possible human carcinogens; fetotoxic and probably teratogenic to humans
Se	gastrointestinal disturbance, liver and spleen damage, anemia; a possible carcinogen, a suspected teratogen
V	acute and chronic respiratory dysfunction

\*US DOE.

*Tableau 1: Effets possibles sur la santé de quelques uns des éléments hasardeux présents dans les charbons. D'après le Department of Energy des Etats-Unis (US DOE) et Finkelman and Bunnell (6)*

On y trouve des traces, comme dans la plupart des roches argileuses, d'isotopes radioactifs : potassium 40, uranium et thorium et les descendants de ces derniers, radium 226, radon 222, polonium 210, etc...

Les teneurs de tous ces éléments varient, parfois de façon très importante, d'un charbon à l'autre.

Les charbons contiennent aussi, comme toutes les roches sédimentaires, de l'eau dont la quantité décroît au cours de leur enfouissement.

Les teneurs en cendres, c'est-à-dire en minéraux restant après combustion, rapportées au poids sec de charbon initial sont également très variables, mais sont en moyenne de l'ordre de 15 % poids pour un charbon commercial, c'est-à-

dire après tri, broyage et lavage pour éliminer au maximum les «stériles », c'est-à-dire les roches situées au contact ou dans les veines de charbon et qui sont inévitablement extraites en même temps que lui. Dans ces cendres, la teneur en éléments non volatils, ce qui est le cas de la plupart des éléments hasardeux, est donc en moyenne de l'ordre de 6 à 7 fois plus importante que dans le charbon initial. Certains charbons, dits charbons du Gondwana, que l'on trouve en particulier en Inde et en Afrique du Sud, ont des teneurs moyennes en cendres particulièrement élevées.

Les stériles sont utilisés en remblayage des exploitations, et/ou accumulés sous forme de terrils à proximité des sites d'extraction. Les boues de lavage, quand elles sont stockées, le sont dans des bassins de contention. Ces matériaux sont ensuite pour une part importants utilisés sous des formes variées par les industries du Bâtiment et les Travaux Publics (BTP).

Les analyses chimiques des charbons sont généralement recalculées sur charbon « pur et sec (sec et sans cendres) », en Anglais dry ash free (daf). **Ils sont constitués très majoritairement de carbone, d'hydrogène et d'oxygène, et d'un peu de soufre et d'azote.** Leurs propriétés physicochimiques, tout en restant dans une gamme caractéristique, varient fortement d'un charbon à l'autre.

Analyses chimiques et propriétés physicochimiques dépendent tout d'abord de la variété des végétaux initiaux et de leurs conditions de dépôt. Elles dépendent encore plus de l'histoire géologique, et en particulier de l'histoire de l'enfouissement.

Les végétaux initiaux sont des arbres et des plantes herbacées riches en lignine et en cellulose, dont l'association forme leurs tissus de soutien (bois, tiges, nervures de feuilles...). Ces constituants se transforment dans le milieu de sédimentation en des gels appelés **vitrinites**, qui sont les constituants majoritaires des charbons (70 % en moyenne). Les parties « externes » des végétaux, cuticules de feuilles, spores, pollens donnent naissance à des constituants minoritaires, mais parfois abondants, classés dans la famille des **exinites**. Une autre catégorie de constituants est formée des **inertinites**, qui résultent surtout de l'oxydation (par exemple feux de forêts, mais aussi oxydation des débris végétaux pendant leur transport jusqu'à leur lieu de dépôt) des constituants précédents. Les charbons du Gondwana, pour des raisons qui ne sont pas très claires, sont particulièrement riches en inertinites. Enfin on trouve aussi les résidus d'algues unicellulaires vivant dans le milieu de sédimentation, sous forme de ce qu'on appelle les **alginites**. Vitrinites, exinites, inertinites, alginites sont appelés **macéraux**, par analogie avec les minéraux des roches, parce que l'on peut les identifier et les classer sous le microscope d'après leurs

propriétés optiques, du moins tant que le charbon n'a pas encore enduré les profondes transformations que provoquent un enfouissement très important. Un charbon se présente donc sous le microscope comme une mosaïque très hétérogène de ces macéraux, dont les proportions mais aussi les compositions chimiques sont variables. L'étude des charbons sous le microscope fait l'objet de la **pétrographie des charbons (7)**.

Il est évident de cette description qu'assimiler les charbons à des « hydrocarbures solides » comme certains le font est une hérésie pour un géochimiste. Rappelons en effet que les hydrocarbures sont des substances composées uniquement de carbone et d'hydrogène et que les mélanges naturels d'hydrocarbures, tels que ceux contenus dans les pétroles, ne sont hétérogènes qu'à l'échelle moléculaire.

L'enfouissement provoque, sous l'effet principalement de l'augmentation de température qui l'accompagne et secondairement sous l'effet de la pression, qui ne peut en elle-même que provoquer que des modifications chimiques mineures, mais par contre des modifications physiques importantes, ce qu'on appelle une **houillification**. Celle-ci est un phénomène de **carbonisation**, c'est-à-dire d'enrichissement en carbone, que l'on repère d'après un indicateur, directement par la teneur en carbone daf, ou indirectement par la teneur en matières volatiles, la teneur en eau, ou le pouvoir réflecteur de la vitrinite, entre autres. Avec ces indicateurs, on classe les charbons d'après leur « **rang** » c'est-à-dire le stade atteint dans le phénomène de houillification: **tourbe** (stade sédiment récent), **lignite mat**, **lignite brillant**, houille appelée également **charbon bitumineux**, **anthracite**, **métaanthracite** (figure 1).

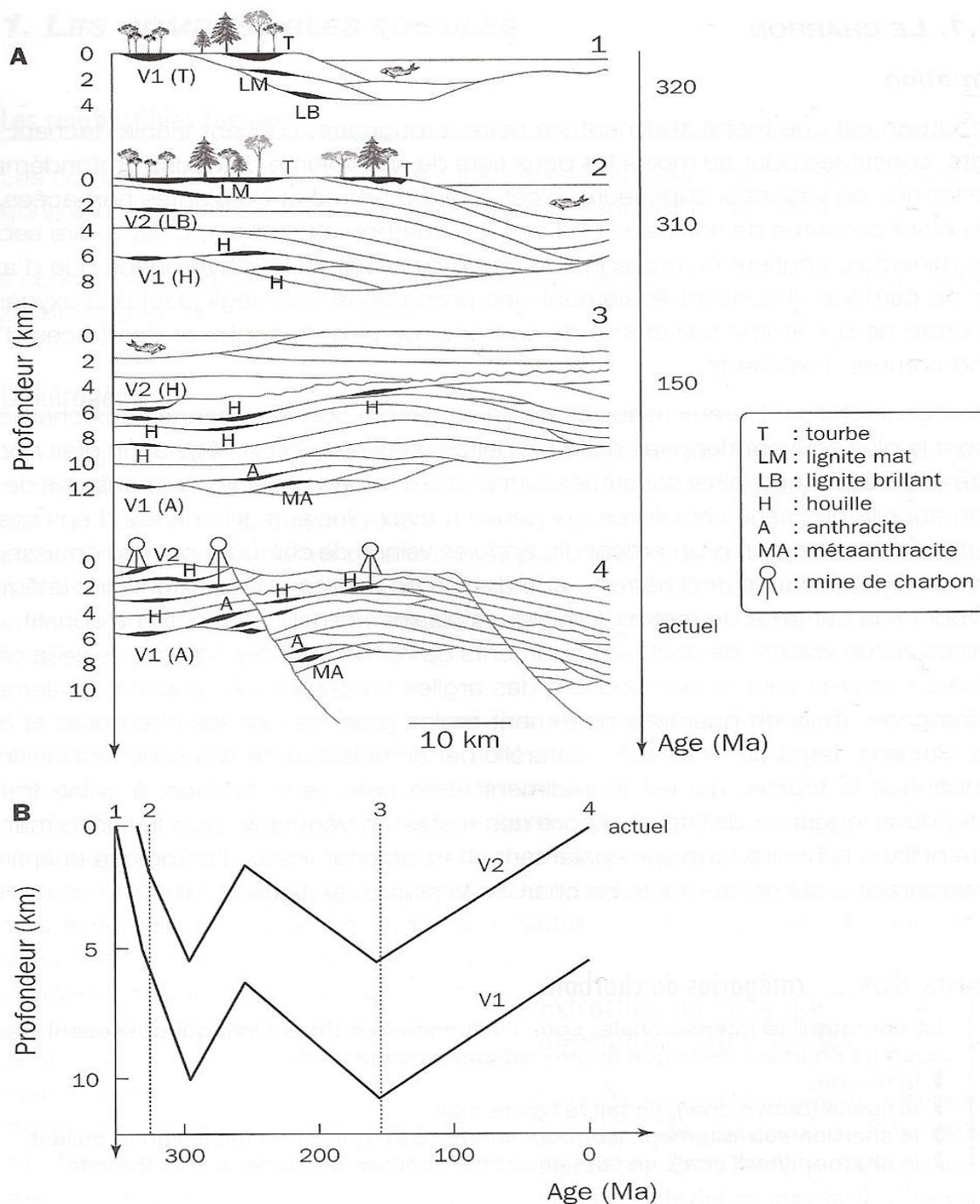


Figure 1 : Sketch montrant quatre étapes de la formation et de la transformation des accumulations de débris végétaux dans un delta soumis à des alternances de subsidences puis de surrections par inversion tectonique. Ces accumulations passent au cours de l'enfouissement par des stades successifs de houillification croissante : tourbe, lignite mat, lignite brillant, houille, anthracite, métaanthracite. Les profondeurs atteintes peuvent être considérables, et l'exploitation en mine des niveaux très houillifiés n'est généralement possible que si il y a « inversion tectonique », autrement dit une surrection faisant remonter les sédiments vers la surface, où ils s'érodent.

*La partie B de la figure montre les variations de profondeur au cours du temps pour deux «veines » de charbon notées V1 et V2 sur la partie A. Sur cette partie A, on peut repérer les stades successifs de houillification de V1 et de V2. La série houillère subit ici une alternance d'enfouissements (approfondissements) et de surrections (remontées vers la surface), comme c'est par exemple le cas pour les charbons de Lorraine. Pendant la deuxième phase d'approfondissement, un autre bassin sédimentaire sans série houillère s'est installé, qui a disparu par érosion au cours de la deuxième surrection. Source: B.Durand (8)*

La destinée des débris végétaux n'est pas obligatoirement de passer par tous ces stades au cours de leur histoire géologique. La plupart se sont ou seront arrêtés en chemin. Les tourbes qui se trouvent par exemple en abondance dans les tourbières des pays Scandinaves et du Nord du Canada et de la Russie sont restées au stade tourbe parce que ces tourbières sont installées sur des «boucliers» cristallins non subsidents. Les charbons de l'ère Tertiaire, abondants en Indonésie mais aussi en Europe, en Allemagne, en Pologne et dans les Balkans, sont le plus souvent des lignites parce qu'ils n'ont pas encore été enfouis autant que ceux du Carbonifère.

La classification des stades de houillification utilisée ci-dessus est une classification naturaliste. Il en existe beaucoup d'autres, souvent basées sur des critères industriels ou des critères locaux, mais elles n'en diffèrent pas fondamentalement. La classification utilisée par exemple par l'Agence internationale de l'énergie (AIE), d'inspiration américaine, est mi-naturaliste mi-industrielle. Elle distingue les stades successifs **peat** (tourbe), **lignite** (lignite mat), **subbituminous coal** (lignite brillant), **bituminous coal** (houille), comprenant le **coking coal** et le «**other bituminous** », et **anthracite**. Le **coking coal** (charbon à coke) est une variété de charbon bitumineux utilisé par l'industrie métallurgique pour produire le coke (9) nécessaire à la fabrication de la fonte en haut-fourneau. Les autres variétés de charbon bitumineux sont utilisées principalement pour produire de la vapeur dans les centrales électriques et de la chaleur dans l'industrie. C'est ce qu'on appelle le **charbon vapeur** (**steam coal**) ou le **charbon thermique**. Ce terme est fréquemment étendu aux variétés de lignites, qui sont aussi utilisées de cette façon. La tourbe, peu importante quantitativement, est utilisée pour le chauffage dans les Pays Nordiques, et en horticulture. L'anthracite n'a guère non plus d'importance quantitative. Elle est utilisée pour le chauffage domestique en particulier dans certains pays asiatiques, sinon elle est utilisée comme le charbon vapeur.

La comptabilité internationale courante est vague et très réductrice : elle ne distingue que le **lignite (brown coal, soft coal)** et le **charbon (hard coal)**, lequel comprend toutes les catégories allant de subbitumineux à anthracite. Mais

le subbitumineux est souvent rangé dans la catégorie brown coal (**10**). La tourbe, qui représente il est vrai peu de chose dans le commerce international, est ignorée.

La combinaison des effets de la composition des débris organiques initiaux et de leurs conditions de sédimentation, et de celui de leur houillification, fait que la variabilité de composition chimique des charbons, calculée sur «**pur et sec**» (en Anglais **dry ash free, daf**) est la plus grande de tous les combustibles carbonés. On peut s'en rendre compte sur un diagramme dit de van Krevelen (**11**) où l'on reporte les rapports H/C et O/C atomiques de ces combustibles (figure 2). S'ajoute à cette variabilité la variété des éléments minéraux et des teneurs en cendres.

De cette variabilité de composition chimique il résulte que les charbons commercialisés ont des pouvoirs calorifiques très variables en fonction de la composition des débris végétaux initiaux, des conditions de sédimentation, de leur rang et de leur teneur en cendres. En pouvoir calorifique inférieur<sup>12</sup> (PCI), les valeurs moyennes vont, en MJ par kg de poids sec, de 5,5 à 14,3 pour les lignites, de 8,3 à 25 pour les charbons subbitumineux, de 18,8 à 29,3 pour les charbons bitumineux et à environ 30 pour les anthracites (**10**).

Les comptabilités des quantités de charbon sont généralement faites en masse de charbon commercialisé: Elles sont alors très imprécises en termes énergétiques. On peut prendre comme règle approximative qu'une tonne de charbon bitumineux moyen équivaut à 0,65 tonne-équivalent-pétrole (tep) , une tonne de charbon subbitumineux moyen équivaut à 0,45 tep et une tonne de lignite moyen à 0,35 tep. La moyenne pondérée selon les masses qui sont produites à l'échelle mondiale de ces différentes catégories est actuellement de 0,5 tep par tonne.

## Composition des combustibles carbonés et des carburants

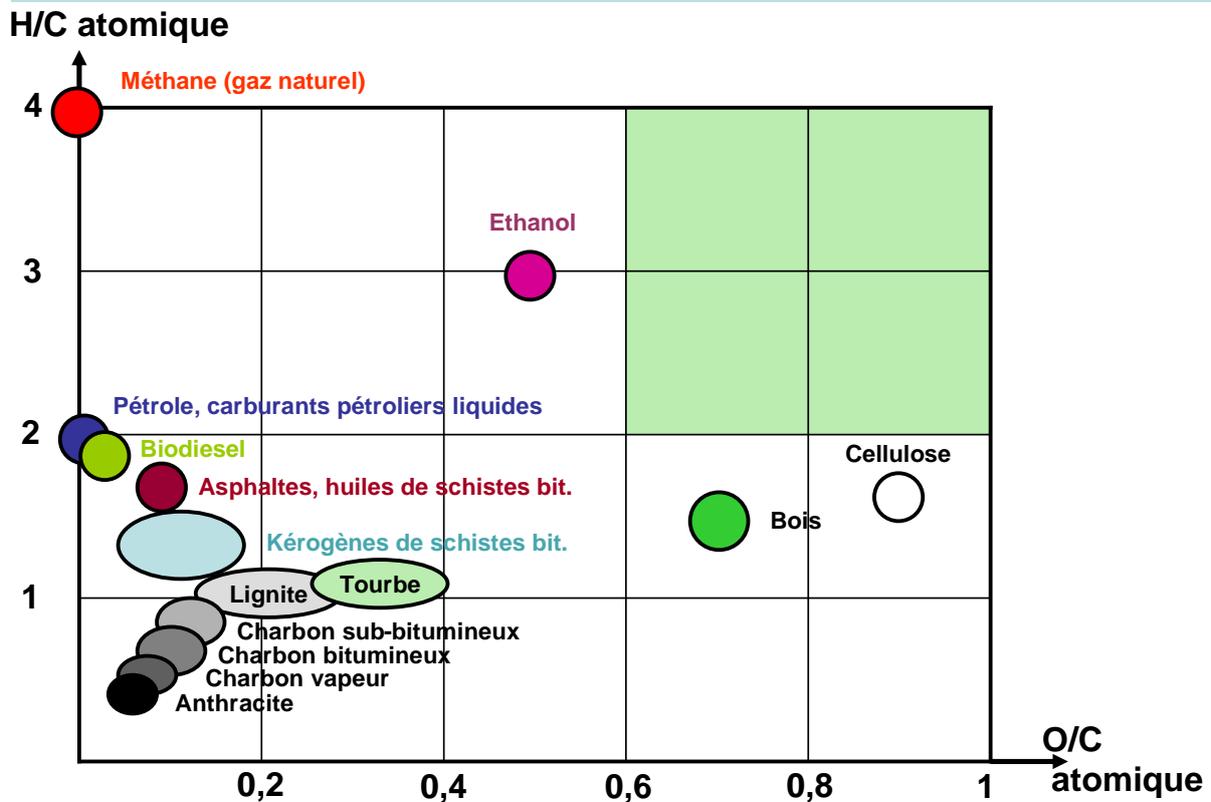


Figure 2 : position des stades successifs de houillification du charbon dans un diagramme de van Krevelen (11) et comparaison avec d'autres combustibles. Rappelons que le carbone, l'hydrogène et l'oxygène constituent l'essentiel des atomes « organiques » présents dans les charbons et dans les autres combustibles. On a aussi indiqué la position du charbon vapeur le plus courant. Les plages elliptiques traduisent la variabilité de composition liée à la variabilité des débris végétaux initiaux et des conditions de leur sédimentation. Le kérogène des schistes bitumineux est la matière organique qu'ils contiennent, source des huiles de schistes obtenues par leur pyrolyse. Source : B.Durand (13)

### 2- Production, principales utilisations, ressources et réserves.

En 2008, selon l'AIE, 27 % de l'approvisionnement mondial en énergie primaire, soit l'équivalent énergétique de 3,3 milliards de tonnes de pétrole (3,3 Gtep) ont été fournis par le charbon sous ses différentes formes. En masse, cela représente 6,63 Gt. On vérifie ici qu'une tonne de charbon ne « vaut », en moyenne pondérée des masses des différentes formes produites, que 0,5 tep. Les productions des différentes formes étaient d'environ 12,5 Mt (1,8 %) pour la

tourbe, 890 Mt (13,4 %) pour le lignite, 615 Mt (9,3 %) pour le subbitumineux, 794 Mt (12 %) pour le «coking coal» (charbon à coke), 4 250 Mt (64,1%) pour le «other bituminous» et 69, 5 Mt (1%) pour l’antracite.

Les principaux producteurs de charbon sont actuellement la Chine et, loin derrière, les Etats-Unis, l’ensemble des pays de l’ancienne URSS et l’Inde. La progression de la Chine est spectaculaire (figure 3): elle correspond à la rapidité de son développement économique, basé principalement sur le charbon.

La hiérarchie est un peu différente si elle est exprimée en énergie contenue: Selon la BP Statistical Review, en 2008 la Chine était en tête avec 1425 Mtep, suivie des Etats-Unis avec 597 Mtep, de l’ex-URSS avec 253 Mtep, de l’Australie avec 220 Mtep et de l’Inde avec 196 Mtep. Venaient ensuite l’Union Européenne (Pologne, Allemagne et République Tchèque principalement), avec 168 Mtep, l’Afrique du Sud avec 153 Mtep, l’Indonésie avec 141 Mtep et la Colombie avec 48 Mtep .

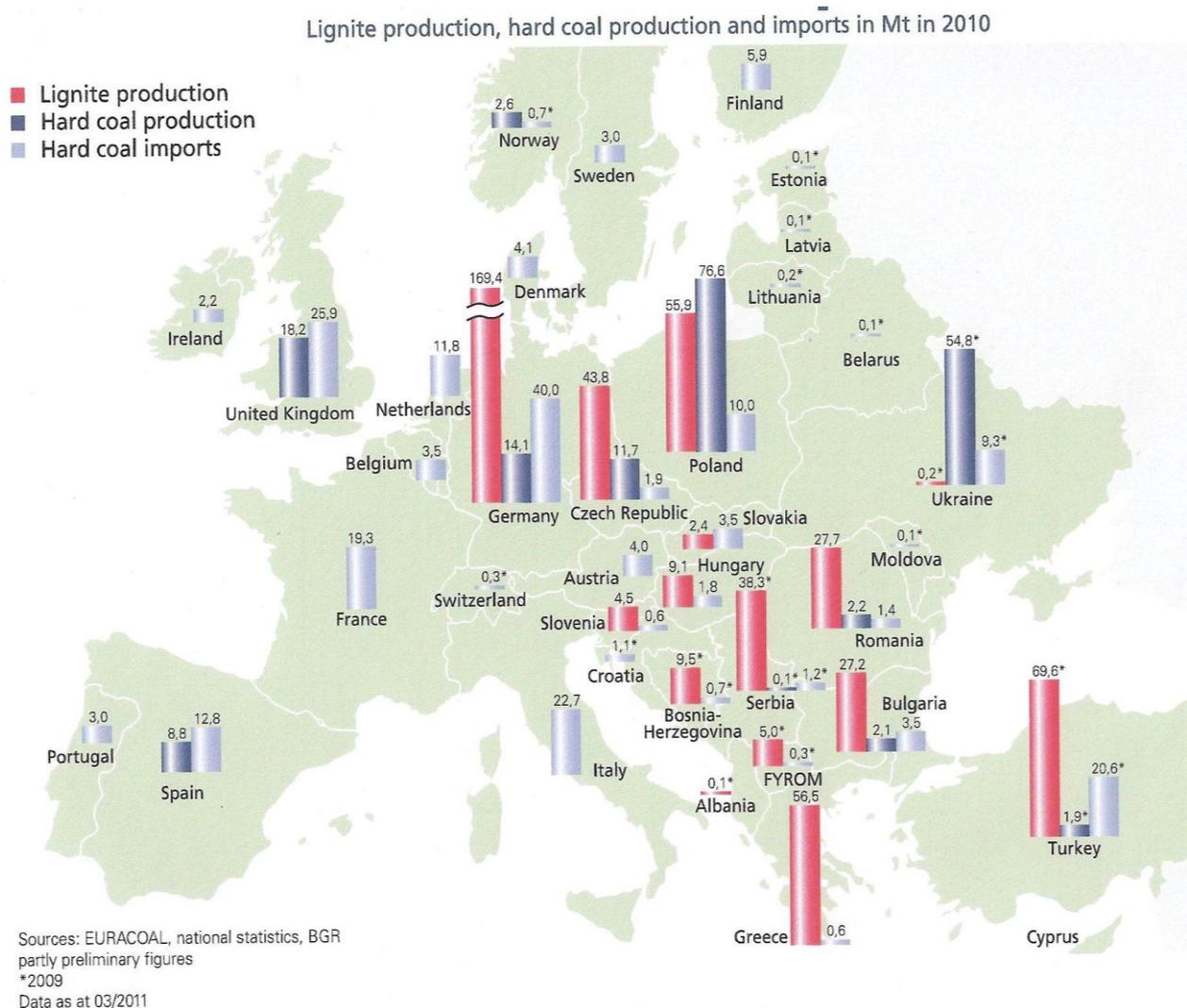


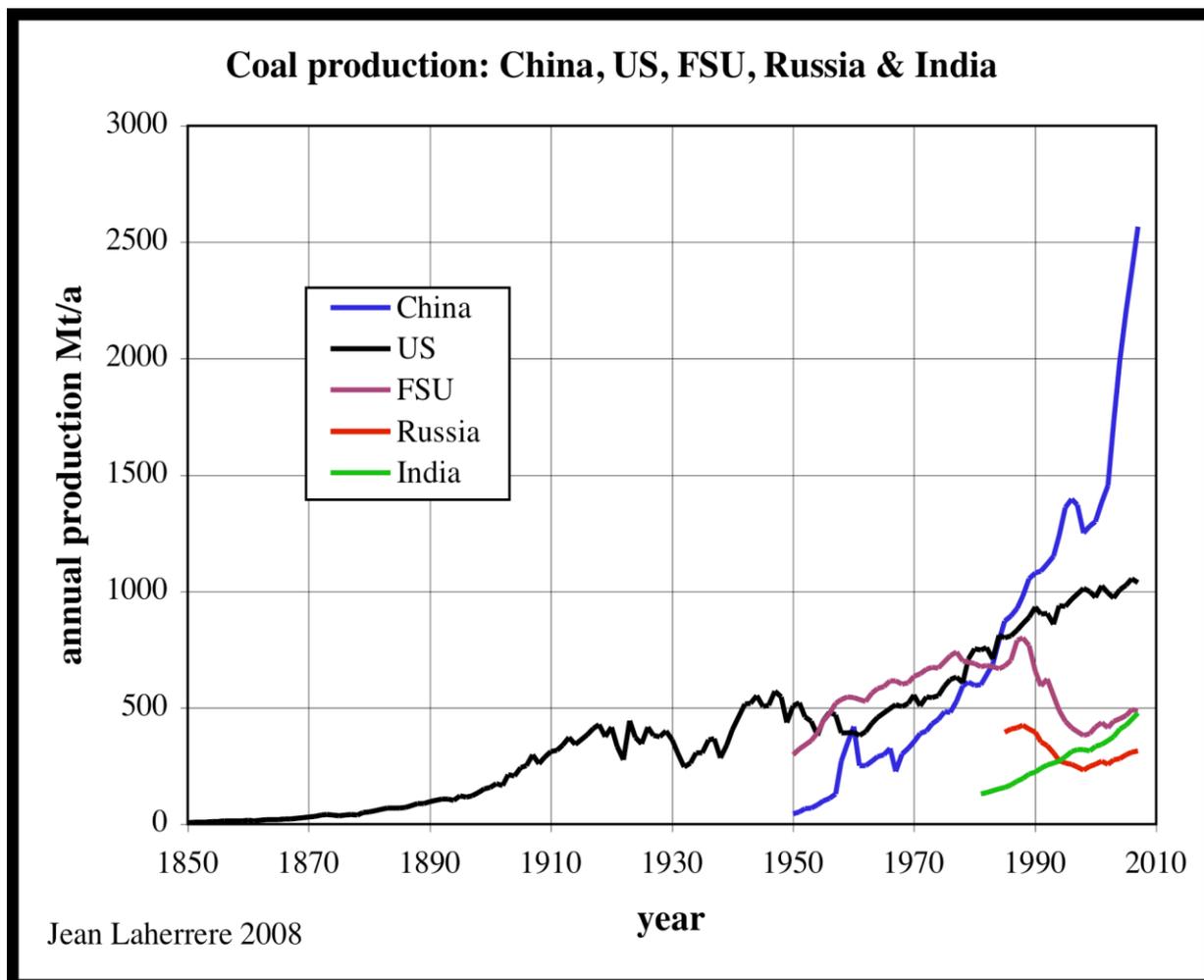
Figure 3: Le charbon en Europe : Production et importations européennes de charbon en 2010, en Mt : on remarque la part importante en masse de la

*production de lignite, particulièrement en Allemagne (premier producteur mondial de lignite), en Pologne, et dans les Balkans où la production de hard coal est très faible. L'Europe des 27 a produit en 2010 396,5 Mt de lignite et 131,6 Mt de hard coal, correspondant à un contenu énergétique d'environ 170 Mtep .*

Le charbon produit est utilisé en très grande partie par le pays producteur, et même en totalité quand il s'agit de lignite: Le commerce international est donc limité, même s'il a tendance à se développer. Actuellement, il ne porte que sur 18 % des quantités produites.

Les utilisations du charbon sont très nombreuses, mais pour l'essentiel il sert à produire de l'énergie sous différentes formes. En 2008 environ 70 % en tonnage ont été utilisés pour la production d'électricité. Ensuite venaient la fabrication de coke métallurgique, 12 %, puis la production de chaleur et de vapeur pour l'industrie, environ 10 %, et le chauffage pour le secteur résidentiel et le secteur tertiaire, environ 5%.

Les ressources en charbon sont réputées très abondantes et dans l'esprit de beaucoup, tellement grandes qu'elles permettent d'envisager la croissance de l'économie mondiale avec tranquillité pendant les deux siècles à venir. Mais la notion de ressources est très vague. En ce qui concerne le charbon, leur estimation est fondée sur des méthodes particulièrement disparates et ne peut être considérée comme fiable. Plus précises sont les réserves, c'est-à-dire les quantités que l'on peut espérer récupérer avec les techniques actuelles et dans les conditions économiques du moment. Les estimations de leur montant ont été révisées fortement en baisse depuis quelques années, non seulement parce qu'une grande quantité en a été consommée chaque année, mais aussi parce que des travaux plus soignés qu'auparavant ont été entrepris, par exemple par le Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) en Allemagne.



*Figure 4: Evolution de la production de charbon des principaux producteurs actuels depuis 1850, en millions de tonnes produites par an (Mt/an). Source : J.Laherrère*

A l'heure actuelle, ces estimations varient de 500 à 1000 Gt environ. Selon Rutledge (14) les pays les mieux pourvus en réserves restant à exploiter sont la Chine, les Etats-Unis, la Russie et l'Australie, mais contrairement à une idée reçue, l'Europe au sens large, en y comprenant l'Ukraine et la Turquie, s'intercalerait entre la Chine et les Etats-Unis ( tableau 2).

Region	Current production Mt	Cumulative production Gt	Long-term production estimate Gt	Reserves + cumulative Gt	Long-term production estimate/ (reserves + cumulative)	Long-term production estimate range Gt	Regression t90
Australia	414	10	50	87	57%	28 - 53 (51%)	2076
China	3,050	51	139	162	86%	107 - 201 (68%)	2051
Africa	253	8	18	40	45%	18 - 27 (49%)	2048
Europe	731	83	134	193	70%	134.1 - 134.4 (0.2%)	2078
Russia	445	28	65	225	29%	40 - 65 (40%)	2101
Western United States	568	17	45	160	28%	42 - 49 (14%)	2054
Eastern United States	404	48	82	137	60%	82 - 99 (21%)	2084
Canada	63	3	4	10	45%	4 - 5 (22%)	2030
South Asia	895	15		86		78 - 113 (40%)	2072
Latin America	94	2		22		12 - 24 (53%)	2088
World coal (with mature regions)	6,941	309	680	1,163	58%	653 - 749 (14%)	2070

*Tableau 2 : Production 2009, production cumulée, estimation des réserves restant à exploiter et date probable de leur épuisement à 90 % pour les différentes régions productrices. Source : D.Rutledge (14)*

D.Rutledge (14) vient d'estimer les réserves mondiales restant à exploiter à 680 Gt pour l'estimation la plus probable, soit l'équivalent de 390 Gtep. 90 % en seraient consommées en 2070. Pour arriver à ce résultat, il a procédé à la linéarisation de Hubbert (15) des historiques de production, après avoir vérifié la validité de cette méthode sur les historiques de production pour des bassins charbonniers pratiquement épuisés, comme les bassins du Royaume-Uni ou des Appalaches de l'Est aux Etats-Unis. Il a constaté au passage que pour ces bassins, les réserves annoncées au début de l'exploitation ont toujours été très supérieures aux réserves réelles.

Le Peak Coal, c'est-à-dire le moment où la production de charbon sera physiquement contrainte de décroître, aurait donc lieu vers 2040 ou 2050 si l'on en croit Rutledge et bien d'autres auteurs. La Chine, dont la production augmente à un rythme effréné, pourrait connaître son Peak Coal vers 2020 (16). Cela s'entend bien sûr en l'absence de révolution technologique permettant d'avoir accès à des réserves beaucoup plus grandes de charbon, comme par exemple la gazéification souterraine. Mais il semble peu probable, étant donné

les énormes dégâts environnementaux qui pourraient en résulter, que cette méthode se généralise.

### **3- Risques environnementaux et sanitaires**

La filière charbon entraîne des risques environnementaux et sanitaires à chacune de ses étapes, de son exploitation à sa mise en œuvre (Lockwood et al. 2009 (17), Epstein et al. 2011(18)). Ces risques sont les plus grands dans les pays sous-développés ou émergents où la « culture du risque » n'est pas encore très développée, que ce soit chez les industriels ou dans la population. Très grossièrement, on peut distinguer le cas des pays de l'OCDE et celui des pays n'appartenant pas à l'OCDE (Non-OCDE). Il est bien sûr impossible de faire des études très détaillées de la question, qui demanderait la consultation de tous les « cahiers de mine » et de tous les registres sanitaires de la planète et on ne peut évaluer que des ordres de grandeurs.

Ces risques sont estimés en mortalité immédiate et en mortalité différée, ainsi qu'en coûts dits externes, c'est-à-dire non intégrés dans le prix du charbon sur les marchés et donc payés indirectement par la collectivité en frais médicaux, pertes de journées de travail, pertes de rendement, surfaces perdues, etc... . En ce qui concerne la mortalité différée, il faut être attentif au fait que, comme pour les effets de la radioactivité, l'exprimer uniquement par un nombre de morts ou d'années de vie perdues donne une idée exagérée du risque couru. Il vaudrait sans doute mieux l'exprimer en diminution de l'espérance de vie de la population concernée. Mais l'exercice est difficile, en particulier dans les pays où les registres de mortalité et sanitaires sont mal renseignés.

#### ***3-1 Risques liés à l'exploitation et au transport :***

Les risques liés à l'exploitation des mines de charbon sont de trois ordres: les atteintes à l'environnement, les risques d'accidents, qui entraînent une forte mortalité chez les mineurs, et les risques sanitaires, qui entraînent une morbidité et une mortalité différée et donc une réduction sensible de l'espérance de vie chez les mineurs, mais aussi dans une moindre mesure chez les populations riveraines des exploitations. Seuls les risques associés aux accidents graves dans les mines et à certaines maladies professionnelles des mineurs comme la silicose sont connues du grand public.

Les exploitations sont de deux types: les exploitations **en mines souterraines** (underground mining), dont les mythes et les dangers ont été ancrés dans l'imaginaire collectif européen dès le 19<sup>ème</sup> siècle entre autres par Upton Sinclair et Emile Zola, et les exploitations à **ciel ouvert** (open cast, open pit), dites encore «en découverte». Celles-ci se pratiquent pour les veines de charbon dont la profondeur est inférieure à quelques centaines de mètres après avoir décapé les «morts-terrains» situés au dessus.

Les risques pour les mineurs sont bien plus grands en mine qu'en découverte. Mais c'est l'inverse en ce qui concerne les risques pour les populations riveraines, et pour l'environnement. Le tableau 3 montre les proportions de l'un et de l'autre pour le «hard coal» dans les grandes zones productrices.

	Australia	East Asia	Russia	South Africa	Eastern Europe	Western Europe	North America	South America
open pit	0.68	0.03	0.33	0.5			0.58	1
underground	0.32	0.97	0.67	0.5	1	1	0.42	

*Tableau 3, d'après Dones et al. 2007 (19). Proportions de mines souterraines et de découvertes pour l'exploitation du hard coal dans les principales zones productrices du globe.*

Le lignite, dont l'essentiel des réserves se trouve à faible profondeur, est très majoritairement exploité en ciel ouvert. En Europe, les principaux producteurs de lignite sont l'Allemagne, la Pologne et les pays des Balkans.

### **3-1-1 Les atteintes à l'environnement.**

Quand il s'agit d'exploitations souterraines, il y a tout d'abord le risque de contamination des eaux par le rejet dans le réseau hydrographique et les nappes phréatiques des eaux d'exhaure, mais aussi des eaux de lavage du charbon pour le débarrasser le plus possible de son contenu minéral, après tri et broyage. Ce lavage se pratique dans des «laveries». Les produits du lavage (boues de lavage, en Anglais sludges) sont des «fines» de roches qui contiennent comme les charbons des produits hasardeux, dont certains peuvent être mis en solution dans l'eau par oxydation, mais aussi les produits chimiques utilisés pour le lavage (annexe). Ils sont stockés, mais pas toujours, dans des bassins de contention (slurry ponds), ce qui n'est pas suffisant pour éviter la contamination des eaux de surfaces si le substratum du bassin n'est pas suffisamment étanche, ou quand il y a débordement ou rupture de digue. Ils sont aussi utilisés pour combler (en Anglais dump) les puits et les galeries de mines abandonnées ou d'excavations diverses (landfills), et cela sans protéger les eaux de surface. Les stériles sont stockés en tas à proximité des exploitations sous forme de terrils (storage piles) qui ont constitué longtemps un trait marquant des paysages du Bassin Charbonnier du Nord et du Pas de Calais, mais aussi des autres bassins français. Le lessivage de ces terrils par la pluie entraîne également un risque de contamination des eaux de surface.

Ces exploitations souterraines provoquent fréquemment sur le long terme des affaissements de terrain en surface avec souvent comme résultat des atteintes aux habitations (fissures, effondrements) dans les zones affectées, qui finissent par provoquer leur abandon.

Les exploitations à ciel ouvert, de plus en plus pratiquées pour des raisons de rentabilité, ont des effets encore plus dévastateurs sur l'environnement. Non seulement le lavage des charbons extraits et le lessivage des stériles y posent problème, tout comme ci-dessus, mais les destructions de l'environnement sont bien plus importantes. Elles sont très développées aux Etats-Unis dans le Wyoming et dans les Appalaches, en Australie dans le Queensland, et en Europe en Allemagne, en Pologne et dans les Balkans.

Deux exemples particulièrement spectaculaires d'atteintes à l'environnement sont les exploitations de hard coal dans les Appalaches aux Etats-Unis et de lignite en Allemagne :

Dans les Appalaches, à l'Est des Etats-Unis, on pratique la technique du « Mountain Top Removal » (MTP) qui consiste à araser le sommet des collines sur plusieurs centaines de mètres de hauteur jusqu'à atteindre les couches de charbon (20). Les produits de cet arasement sont ensuite déversés dans les vallées adjacentes jusqu'à les combler, détruisant ainsi les cours d'eau et la vie aquatique, et polluant les nappes phréatiques sur des surfaces très importantes. La surface concernée est déjà de l'ordre de 6000 km<sup>2</sup> (18) Les explosions perturbent la vie des habitants et projettent des morceaux et des poussières de roches sur de grandes distances. Les produits du lavage du charbon sont stockés dans de gigantesques bassins de contention (slurry ponds) qui polluent les eaux de surface.

En Allemagne, les immenses mines de lignite de la région de Cologne ou de Lusace en ex-Allemagne de l'Est, paraît-il maintenant aussi visibles de l'espace que la muraille de Chine, sont exploitées par des excavatrices géantes sur quelques centaines de mètres de profondeur. Ceci n'est possible qu'en « rabattant » par pompage la nappe phréatique sur au moins cette hauteur, de manière à ce que l'exploitation ne soit pas envahie par l'eau. Dans la zone d'exploitation appelée « baie de Cologne », un peu à l'Ouest de la ville du même nom, les forêts ont par exemple été rasées et les rivières détournées, et la nappe phréatique a été rabattue de 300 mètres sur 3000 km<sup>2</sup> (21). Les quantités de roches déblayées, extraites et lavées sont gigantesques, de plusieurs milliards de m<sup>3</sup> par an, et sont accumulées près des exploitations sous forme de terrils tabulaires pouvant avoir jusqu'à 200 mètres d'épaisseur. Les quantités d'eau utilisées sont également gigantesques !

Le lessivage des terrils par les eaux de pluie remobilise les éléments hasardeux, qui se retrouvent dans les nappes phréatiques. Les surfaces directement affectées sont pour l'instant de l'ordre de 1500 km<sup>2</sup>, mais la surface potentiellement concernée est de l'ordre de 10 000 km<sup>2</sup> (figure 4)

Des dizaines de villages ou de bourgs ont été détruits et plus de 100 000 personnes ont été déplacées!  
Des exploitations analogues, bien que de moins grande ampleur, existent dans beaucoup de pays des Balkans (22).

Il en existe également dans les autres pays grands producteurs de charbon où l'essentiel des exploitations ont lieu à ciel ouvert, en particulier en Australie dans le Queensland et aux Etats-Unis dans le Wyoming.

Ces exploitations sont par la suite « réhabilitées » par création de nouveaux paysages, en particulier en créant des lacs destinés aux loisirs aquatiques. Mais ces surfaces sont soustraites aux activités agricoles et à l'habitat, et même devenues de fait quasiment inhabitables. Le régime des eaux de surface est également profondément perturbé, et ces eaux sont durablement polluées, et parfois tellement acides qu'elles n'abritent plus ni faune ni flore (Green Peace, 23).

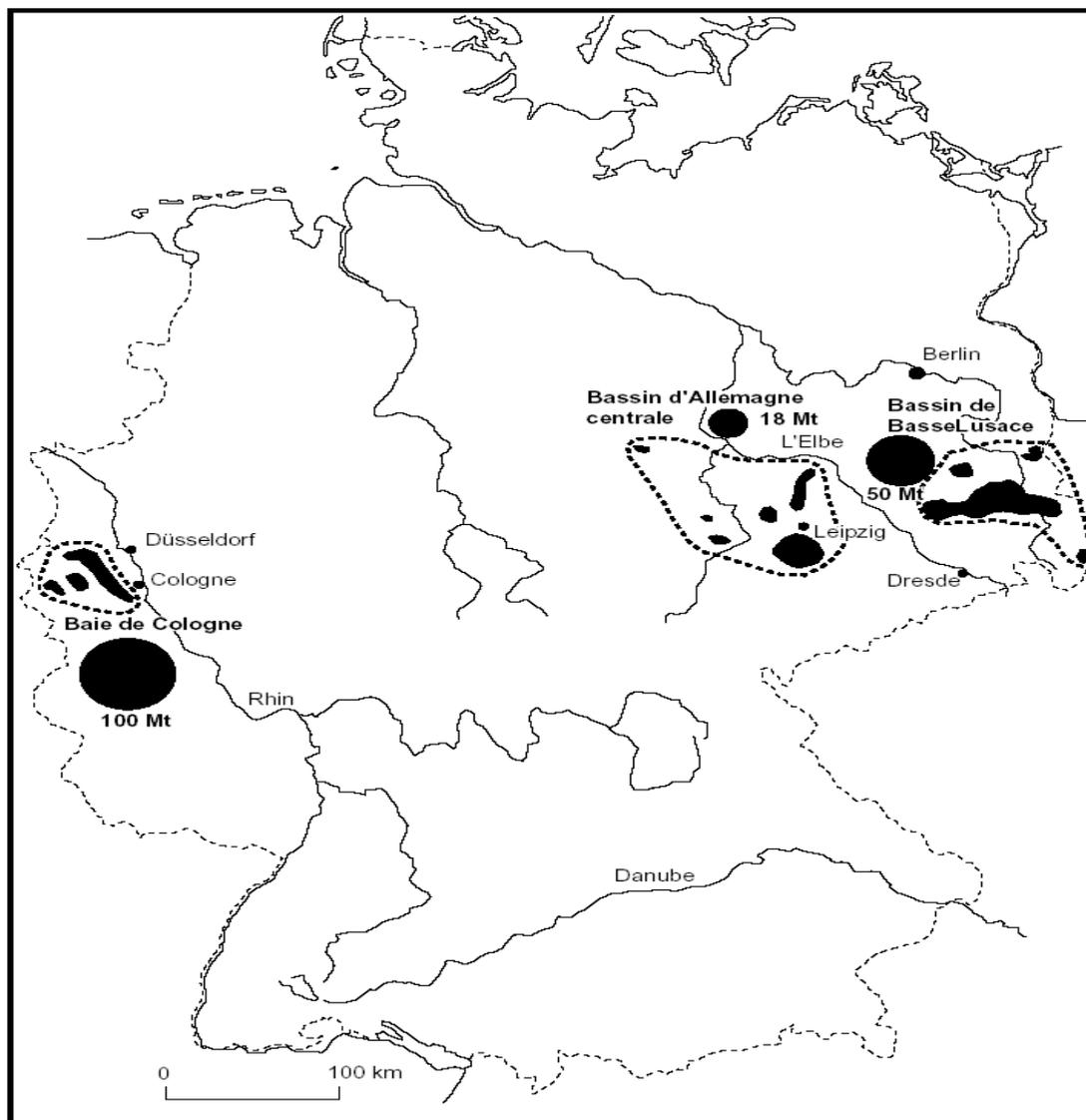


Figure 4 : Les grandes régions d'exploitation du lignite en Allemagne.  
D'après Deshaies (21)

Les charbons, mais aussi les « stériles » quand ils sont riches en matière organique, s'échauffent spontanément quand ils sont mis en contact en atmosphère humide avec l'oxygène de l'air. Car l'oxygène se fixe alors, même à basse température, sur la matière organique, et cette réaction est exothermique. Si le charbon ou les stériles sont accumulés en masse importantes, comme c'est presque toujours le cas en tas sur le carreau des mines et des centrales électriques, ou dans des terrils, une combustion lente peut alors se produire du fait des difficultés d'évacuation de la chaleur produite. Le danger est particulièrement important dans les quartiers de mine abandonnés, où le charbon se consume très lentement, produisant des fumées toxiques (oxyde de carbone, dioxyde de soufre, benzène, toluène, xylène, éthylbenzène, mercure, arsenic...).

. Le phénomène, très fréquent dans les petites mines mal gérées des pays en développement, en Inde particulièrement, mais survient aussi dans des pays développés, Etats-Unis ou Afrique du Sud par exemple (Finkelman, 24). Il est quasiment impossible à arrêter et peut durer des dizaines d'années. C'est aussi une préoccupation constante des exploitants de centrales à charbon, non seulement à cause du danger potentiel que cela représente, mais aussi à cause de la diminution de pouvoir calorifique du charbon qui en résulte.

Le transport du charbon a également des conséquences sur l'environnement : En Chine, une très grande part du trafic sur les lignes ferroviaires et sur les routes est dû au transport du charbon des mines aux utilisateurs. Des dizaines de milliers de tonnes de fines poussières sont ainsi chaque année mises à l'atmosphère et se déposent au voisinage des voies de circulation, dont une partie sur les habitations. Selon Lockwood et al. (17) 50 000 tonnes de particules et 600 000 tonnes d'oxydes d'azote provenant des locomotives diesel servant à ce transport, sont émises ainsi chaque année aux Etats-Unis. Et la longueur cumulée des trains transportant ce charbon en une année serait équivalente à la distance entre Washington et Adélaïde !

Observons au passage que le contenu en éléments volatils, méthane et gaz carbonique en particulier, entraîne pendant le transport des émissions de gaz à effet de serre qui ne sont pas comptabilisées dans les statistiques officielles. Les émanations de méthane, mais aussi la propension signalée plus haut du charbon à l'autoinflammation entraînent aussi des dangers d'incendie ou d'explosion dont doivent par exemple se préoccuper les équipages des cargos vraquiers en charge du transport du charbon par voie maritime.

### ***3-1-2 La mortalité directe (instantanée)***

Le souvenir de la catastrophe de Courrières, qui a entraîné la mort de 1099 mineurs en Mars 1906 suite à un coup de poussière (25), est toujours vivace dans la mémoire des Français. D'autres grandes catastrophes sont celles de Honkeido en 1942 en Manchourie, 1542 morts, de Clydestale en 1960 en Afrique du Sud, 435 morts, de Luisenthal en 1962 en Allemagne, 284 morts, de Marcinelle en 1956 en Belgique, 273 morts.

Huguenard et al. (26) ont identifié entre 1958 et 1995 250 accidents graves dans le monde, qui ont entraîné la mort d'environ 8000 personnes, soit une moyenne de près de 7 accidents par an, de 32 morts par accident et de 216 morts par an ! Mais cette compilation ne comprend que très peu des accidents survenus en Chine et en Inde.

Le Paul Scherrer Institute (PSI) (27) a publié une compilation des accidents ayant entraîné la mort de plus de 5 personnes, imputables à l'exploitation du charbon entre 1960 et 2000: hors Chine, 179 de ces accidents se sont produits et

ont entraîné la mort de 7090 personnes. Cela recoupe bien l'estimation précédente.

Mais ne sont pas pris en compte dans ces compilations les accidents ayant fait moins de 5 morts, de loin les plus nombreux. Martin-Amouroux (28) fait état, tous accidents confondus et pour 100 Mt extraites, de 1,7 morts en Australie, 3,1 aux Etats-Unis et 10,7 en Afrique du Sud. Ces différences sont dues surtout à la proportion de charbon extrait à ciel ouvert, où les dangers d'accident sont bien moins grands à la tonne produite qu'en mine souterraine. Rapportées à la production 2008 de charbon de ces trois pays, cela fait au total environ 100 morts par an.

Les plus graves de ces accidents concernent les mines souterraines et résultent de coups de grisou ou de poussières, ou d'inondations.

Certains accidents, non répertoriés par les statistiques d'accidents miniers parce qu'ils concernent les riverains, sont dus entre autres à des ruptures de digues de stockages de boues de lavages : le 26 février 1972, un accident de ce type a eu lieu en Virginie Occidentale aux Etats-Unis, faisant 125 morts, 1100 blessés et 4000 sans abris (20).

**A partir de ces études, on peut estimer que dans les pays de l'OCDE, l'exploitation du charbon a fait environ 150 à 200 morts par an ces dernières années, soit de l'ordre de 10 à 15 morts par 100 Mt extraites.**

Cette mortalité directe était beaucoup plus forte avant la seconde guerre mondiale. Epstein et al.(18) évaluent par exemple à environ 100 000 le nombre de morts par accidents dans les mines américaines depuis 1900 aux Etats-Unis, ce qui pour une production totale d'environ 55 milliards de tonnes, représente en moyenne environ 180 morts pour 100 Mt extraits. Il est bien évident qu'elle était beaucoup plus forte en 1900 que maintenant, où elle n'est plus que de l'ordre de 3. Les pays européens n'étaient pas mieux lotis. Le « reportage » de Florence Loriaux (29) sur la dangerosité des mines en Belgique entre les deux guerres est à cet égard édifiant. La mécanisation, en faisant diminuer le nombre de mineurs de fond, et le souci croissant de la sécurité au travail, a fait baisser très fortement la mortalité dans les pays de l'OCDE.

Pour les pays non-OCDE, l'attention s'est focalisée sur la Chine, actuellement de très loin le premier producteur mondial de charbon. Selon le PSI (27), 1044 accidents ayant fait au moins 5 morts s'y sont produits de 1960 à 2000, faisant environ 18 000 victimes, soit 450 morts par an. Mais les accidents ayant fait moins de 5 morts, de loin les plus nombreux, ne sont pas ici pris en compte. Epstein et al.(18) font état de 3800 à 6000 morts par an, en moyenne en diminution régulière cependant, puisque « seulement » 2631 morts auraient été officiellement répertoriées en 2009. Les estimations de Martin-Amouroux (28) vont de 5000 à 20 000 morts par an, selon que l'on prend les estimations qui ne

concernent que les mines d'état, ou que l'on y ajoute la multitude de petites mines privées ( figure 5 ) où la sécurité des mineurs n'est pas un souci. Mais l'Inde n'est pas mieux lotie, ni même des pays comme l'Ukraine ou la Russie, réputés être les pays où les exploitations souterraines sont les plus dangereuses après celle de la Chine et de l'Inde ! Si l'on retient pour les pays non-OCDE le taux de mortalité chinoise au prorata de leur production, **une mortalité directe dans les mines de l'ordre de 10 000 à 20 000 morts par an pour l'ensemble des pays non membres de l'OCDE semble assez probable, soit de l'ordre de 250 à 500 morts par 100 Mt extraites, 20 à 50 fois plus que dans les pays de l'OCDE.**



*figure 5: une mine de charbon «artisanale» dans la province de Guizhou en Chine. Source : Finkelman and Bunnell (6)*

Et tout cela ne prend probablement pas en compte la mortalité résultant des accidents, qui comme pour les accidents de la route en France, n'est pas comptabilisée dans la rubrique accidents de la route si la mort ne survient pas moins de 15 jours après l'accident.

Il faut cependant noter, à propos de l'énorme différence de mortalité entre OCDE et non-OCDE, qu'une partie de cette différence vient du fait que les exploitations à ciel ouvert, peu dangereuses, sont en proportion beaucoup plus importantes dans les pays de l'OCDE, que dans les Pays non-OCDE et en particulier en Chine et en Inde. Il faut aussi noter les progrès très rapides faits en Chine pour diminuer la mortalité dans les mines de charbon.

### *3-1-3 La mortalité différée (prématurée)*

#### *3-1-3 La mortalité différée (prématurée)*

##### *Les maladies professionnelles (occupational diseases)*

Les maladies professionnelles liées à l'exploitation du charbon sont nombreuses. La plus connue est une maladie pulmonaire, la **silicose** (en Anglais black lung), résultat de l'inhalation continuelle de très fines particules de silice en suspension dans l'atmosphère des exploitations (20). Une maladie analogue est l'asbestose des poseurs d'amiante, dont on connaît les ravages actuellement en France.

Selon Rosental (30), la silicose a fait officiellement 34 000 morts en France de 1946 à 1987, mais plus probablement environ 100 000 étant donné les difficultés de faire reconnaître cette maladie et la faible couverture sociale des nombreux mineurs immigrés (Polonais, Italiens, Yougoslaves à l'époque). Étant donné le temps de latence de la maladie, de l'ordre de la vingtaine d'années, cette valeur est à rapporter à la production de charbon en France de 1926 à 1967, soit environ 1,7 milliards de tonnes. La prévalence de la silicose a donc été pendant cette période de l'ordre de 6000 morts prématurées par 100 Mt extraites. Extrapolé à l'échelle mondiale, si l'on suppose que les conditions moyennes de protection des travailleurs sont sans doute actuellement à peu près les mêmes que dans la France de cette époque cela donne actuellement 380 000 morts prématurées par an dues à la seule silicose ! Or il y a bien d'autres maladies professionnelles que la silicose chez les mineurs et en particulier la pneumocoquiose due à l'accumulation de poussières de charbon dans les voies respiratoires (31, 32), qui fait des ravages presque équivalents. Signalons également les effets cancérigènes du radon 222, qui peut être présent en concentrations critiques dans les mines mal aérées, comme le sont les mines artisanales de l'Inde et de la Chine.

**Un ordre de grandeur de 500 000 morts différées par an à l'échelle mondiale paraît donc assez probable.**

A nouveau, l'essentiel de cette mortalité est à imputer aux pays n'appartenant pas à l'OCDE, et en particulier à la Chine et à l'Inde, mais aussi à l'Ukraine et à la Russie. On observe cependant que même dans un pays comme les États-Unis, la mortalité par silicose due à l'exploitation du charbon demeure importante, puisque selon Lockwood et al. (17) elle aurait encore fait environ 1000 morts en 2006. En Allemagne, 1158 cas de silicose et de pneumocoquiose ont été recensés en 2003 chez les mineurs de charbon (Baur et al., 33) mais la mortalité prématurée correspondante n'est pas indiquée. Elle est probablement à peu près équivalente, car il s'agit de maladies à peu près inguérissables. Même en France, où il n'existe plus de mines en activité,

il y aurait encore selon Rosental (31) quelques centaines de morts par an dues à des silicoses contractées du temps des exploitations.

A l'échelle mondiale la mortalité différée due aux maladies professionnelles serait donc chez les mineurs de 20 à 25 fois plus importante que la mortalité directe due aux accidents.

### *Les maladies dans les populations riveraines*

Les exploitations et le transport ont sans aucun doute des conséquences sur la santé des populations riveraines, mais il est bien difficile de les quantifier. Selon Lockwood et al. (17) des évaluations ont été faites aux Etats-Unis, qui semblent montrer que les populations vivant dans les régions très productrices ont une fréquence plus élevée de maladies cardiopulmonaires, d'hypertension et de maladies rénales. On observe dans les Appalaches, dans les régions où l'on pratique beaucoup le MTR, une contamination des eaux par l'arsenic et d'autres polluants. Le lessivage des mines abandonnées par les eaux superficielles entraîne une acidification des eaux et leur contamination par des métaux lourds. Les feux de mines entraînent une importante pollution atmosphérique locale pendant de longues périodes. Les conséquences de tout cela sur la mortalité ne peuvent être évaluées que par des études épidémiologiques, rarement entreprises et forcément imprécises. Selon Finkelman (24), pour l'Environmental Protection Agency (EPA) des Etats-Unis il n'y a pas pour l'instant d'évidence aux Etats-Unis qu'en ce qui concerne les exploitations, les éléments en trace présents dans les charbons aient d'incidence sur la santé. Mais ces conclusions sont de plus en plus vigoureusement contestées aux Etats-Unis (17,18)

En Europe, les pays grands producteurs de charbon et de lignite comme l'Allemagne, la Pologne et les pays Balkaniques sont étonnamment discrets à ce sujet.

Ces conséquences sont par contre évidentes dans un certain nombre de cas où le charbon ou le lignite présentent des concentrations très anormales en certains éléments hasardeux que l'on peut relier à des maladies caractéristiques, sans que des précautions suffisantes soient prises pour éviter ces maladies dans les populations concernées, faute d'informations et de protection sanitaire.

Dans les Balkans sévit par exemple une maladie appelée Néphropathie endémique des Balkans (Balkans Endemic Nephropathy, BEN), attribuée à la proximité d'exploitations de lignites surplombant les villages, en particulier dans les vallées du Danube et de ses affluents. Cette maladie provoque des maladies et des cancers des reins et serait due à la présence de molécules organiques particulières dans ces lignites, qui sont mobilisées par les

exploitations. Plusieurs dizaines de milliers de personnes sont ainsi atteintes (Finkelman and Bunnell, 6).

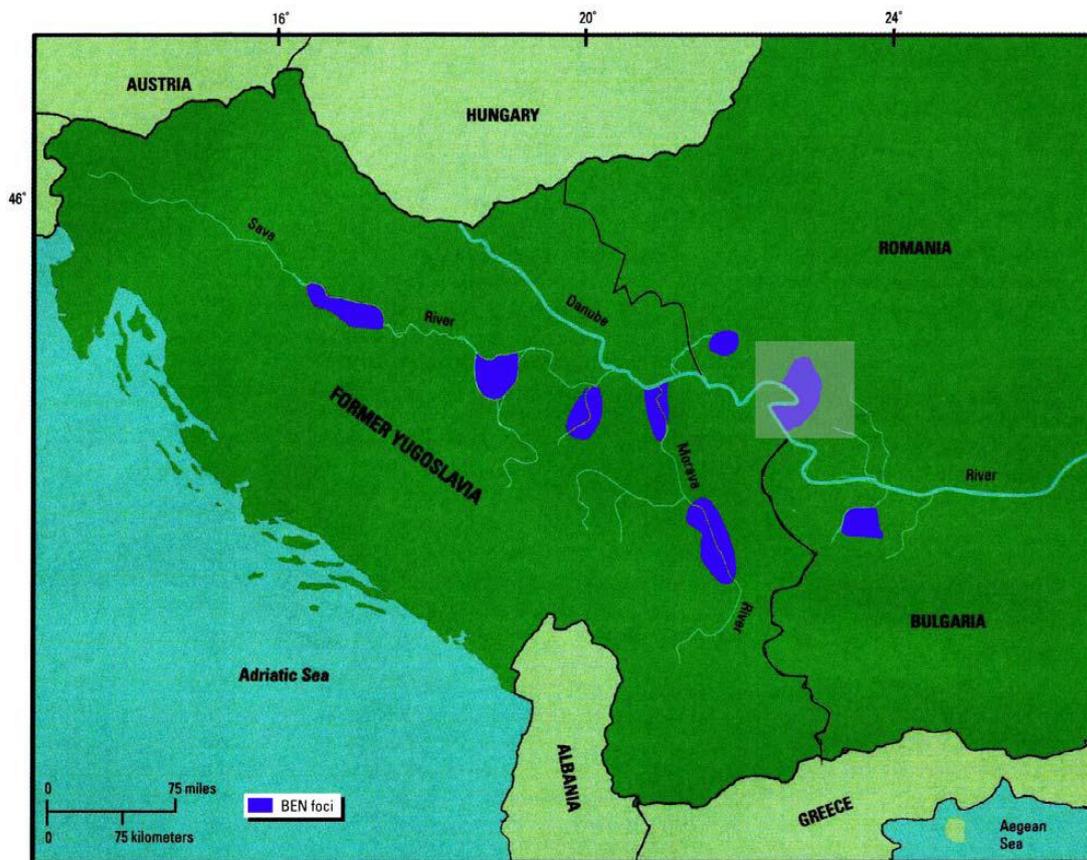


Figure 6 : régions des Balkans affectées par la néphropathie endémique, d'après Finkelman and Bunnell (6)

**Malgré des évidences d'effets importants dans quelques pays, on ne connaît donc pas actuellement véritablement à l'échelle mondiale l'ordre de grandeur de la mortalité différée et de la morbidité provoquées dans les populations riveraines par l'extraction du charbon !**

Finkelman a proposé, pour progresser dans la quantification des relations entre les contenus en éléments hasardeux des charbons et la santé publique, de cartographier beaucoup plus complètement qu'actuellement ces teneurs en éléments hasardeux, de manière à délimiter les zones anomaliques, et les confronter avec la prévalence des maladies dont on sait qu'elles peuvent être liées à ces éléments. Cette proposition n'a pas eu de succès à ce jour.

### **3-2 Les risques dus à l'utilisation du charbon**

Seuls les dangers dus aux accidents et à la silicose sont ancrés dans l'imaginaire collectif des pays de l'OCDE. Les citoyens de ces pays, où ces dangers ont

maintenant considérablement régressé, sont donc bien souvent d'une grande indifférence aux risques du charbon, puisqu'ils sont persuadés que ces risques sont réservés aux seuls mineurs de pays lointains. Ils dormiraient peut-être moins tranquilles s'ils savaient que l'utilisation du charbon par leurs centrales électriques leur fait courir des risques très sérieux. Une prise de conscience est en cours aux Etats-Unis. Elle tarde à venir en Europe, faute d'information par les médias.

### ***Les produits de la combustion du charbon :***

*Tous les combustibles carbonés, biomasse y comprise, produisent lors de leur combustion des produits dangereux.*

*En ce qui concerne le charbon, nous avons vu plus haut le cas des éléments minéraux «hasardeux ». Parmi ces éléments minéraux se trouvent des isotopes radioactifs.*

*Les éléments minéraux se retrouvent soit dans les cendres de foyer (bottom ash), soit sur les filtres à fumées, soit dans ce qu'on appelle les cendres volantes (fly ash). Leurs teneurs y sont de l'ordre de 10 fois supérieures à ce qu'elles sont dans le charbon initial. Certains, comme le mercure ou le radon 222, sont à l'état gazeux dans le gaz de combustion (flue gas) et ne peuvent être arrêtés par les filtres.*

*Les gaz de combustion du charbon contiennent aussi un certain nombre de polluants non minéraux, dont les principaux sont :*

***Les oxydes de soufre:*** appelés SO<sub>x</sub> parce qu'il s'agit d'un mélange de plusieurs oxydes, le principal d'entre eux est le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>). Ils sont produits par la combustion du soufre contenu dans les charbons, sous forme organominérale ou contenus dans certains minéraux comme la pyrite et la blende. SO<sub>2</sub> est un irritant respiratoire dangereux à faible dose, en particulier pour les asthmatiques. Il produit aussi avec l'eau de pluie de l'acide sulfurique qui va, sous forme de pluies acides, acidifier les lacs et en détruire la faune, ou attaquer les pierres calcaires de construction, et cela à des distances des sources de pollutions qui peuvent atteindre plusieurs centaines de kilomètres.

***Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et les dioxines :*** Certains d'entre eux sont de puissants cancérigènes.

***L'ammoniac (NH<sub>3</sub>) :*** c'est un puissant irritant respiratoire et cutané

***Les goudrons:*** Ce sont des produits de pyrolyse, c'est-à-dire de décomposition des combustibles par la température, qui n'ont pas le temps d'être brûlés lors de la combustion. Ils forment les dépôts noirs et visqueux observables dans les conduits de cheminée. Ils sont agressifs pour la peau et cancérigènes.

***L'oxyde de carbone (CO):*** c'est un gaz mortel à faible dose. Il est produit par une combustion en déficit d'oxygène et est à l'origine de nombreuses intoxications quand la combustion a lieu dans un milieu confiné.

**Les oxydes d'azote:** souvent appelés NOx parce qu'il s'agit d'un mélange de différents oxydes, ils sont produits par combinaison de l'azote et de l'oxygène de l'air au contact de surfaces à haute température, et ne sont donc pas spécifiques du charbon. Cette production commence à devenir critique au-dessus de 1000°C, températures atteintes dans beaucoup d'installations industrielles utilisant les combustibles fossiles, charbon y compris. Ce sont des toxiques du système nerveux. Ils contribuent également à la formation des pluies acides.

**Les composés organiques volatils (COV):** hydrocarbures ou aldéhydes volatilisés lors de la combustion, certains sont toxiques comme l'acroléine ou cancérigènes à faible dose comme le benzène. Ils contribuent par réactions photochimiques dans l'atmosphère impliquant les oxydes d'azote et le monoxyde de carbone à la formation d'ozone (O3) troposphérique à la périphérie des villes. Cet ozone est un toxique et un irritant respiratoire.

**Les suies ou particules :** la combustion du charbon produit une grande quantité de particules très fines tant minérales qu'organiques, qui représentent dans la plupart des cas le principal danger de la combustion du charbon.

**L'Organisation mondiale de la santé (OMS) vient d'estimer (34) que, chaque année, plus de 2 millions de personnes meurent du fait de l'inhalation de particules fines présentes dans l'air intérieur et extérieur.** Les particules dites PM<sub>10</sub>, d'un diamètre inférieur à 10 micromètres (μ), et surtout les PM<sub>2,5</sub>, d'un diamètre inférieur à 2,5 μ, peuvent pénétrer dans les poumons, entrer dans la circulation sanguine et provoquer des cardiopathies, des cancers du poumon, des cas d'asthme et des infections des voies respiratoires inférieures. Ces émissions de particules ne sont pas dues bien sûr uniquement à la combustion du charbon, la combustion du bois et la circulation automobile ayant par exemple une grosse responsabilité, mais le charbon est explicitement désigné par l'OMS comme une source majeure de ces particules fines. **Notons que ces particules peuvent se former secondairement, loin des émetteurs initiaux, sulfates formés à partir des SOx et nitrates formés à partir des NOx plus particulièrement. Ces particules secondaires représenteraient en fait le danger le plus important (45)**

### **3-2-1 L'utilisation domestique du charbon.**

**“Domestic coal combustion has had profound adverse effects on the health of millions of people worldwide. In China alone several hundred million people commonly burn raw coal in unvented stoves that permeate their homes with high levels of toxic metals and organic compounds. At least 3,000 people in Guizhou Province in southwest China are suffering from severe arsenic poisoning. The primary source of the arsenic appears to be consumption of chili peppers dried over fires fueled with high-arsenic coal. Coal samples in the region were found to contain up to 35,000 ppm arsenic. Chili peppers dried over high-arsenic coal fires adsorb 500 ppm arsenic on**

average. More than 10 million people in Guizhou Province and surrounding areas suffer from dental and skeletal fluorosis. The excess fluorine is caused by eating corn dried over burning briquettes made from high-fluorine coals and high-fluorine clay binders. Polycyclic aromatic hydrocarbons formed during coal combustion are believed to cause or contribute to the high incidence of esophageal and lung cancers in parts of China. Domestic coal combustion also has caused selenium poisoning and possibly mercury poisoning. Better knowledge of coal quality parameters may help to reduce some of these health problems. For example, information on concentrations and distributions of potentially toxic elements in coal may help delineate areas of a coal deposit to be avoided. Information on the modes of occurrence of these elements and the textural relations of the minerals and macerals in coal may help predict the behavior of the potentially toxic components during coal combustion". Finkelman et al. (35)

L'utilisation domestique du charbon, chauffage et cuisine, ne représente plus à l'heure actuelle qu'environ 5 % en masse du charbon utilisé, mais une part beaucoup plus grande des dommages qu'il cause à la santé. Et c'est dans les pays en voie de développement et émergents où il est encore beaucoup utilisé, que ses ravages sont les plus importants du fait de modes d'utilisation en milieu confiné. La première cause de mortalité et de morbidité est due aux fumées dégagées dans les habitations, qui contiennent une grande quantité de  $PM_{10}$ , ainsi qu'à l'oxyde de carbone dégagé par des combustions en déficit d'oxygène. Le romancier Emile Zola est mort en 1902 d'avoir dormi dans une chambre où un feu de boulets de charbon, couvant dans une cheminée dont le conduit avait été fermé, a produit de l'oxyde de carbone. D'autre part ces fumées imprègnent les lieux d'habitation en substances toxiques, métaux lourds et molécules organiques. Les femmes et les enfants, qui passent une grande partie de leur temps dans les lieux où l'on brûle du charbon, en sont les principales victimes. Notons à ce propos que l'usage du bois dans les mêmes conditions, qui produit à peu près les mêmes polluants, fait des ravages encore plus grands, étant donné que le bois est dans ces pays l'énergie la plus utilisée par les ménages. Ce qui montre que le caractère renouvelable d'une énergie ne signifie pas automatiquement qu'elle est sans danger.

Mais il existe aussi dans certaines régions des effets qui sont dus à la présence de concentrations anormales d'éléments hasardeux dans les charbons utilisés, et à des pratiques alimentaires où l'on prépare certains aliments dans la fumée de feux de charbon.

En Chine par exemple, la pratique du séchage de piments au dessus de poêles utilisant des charbons très riches en arsenic est responsable de graves maladies dans certaines provinces (figure 7). Celle de Guizhou est particulièrement affectée, avec au moins 3000 personnes très sévèrement atteintes (figure 7). Dans cette province également, les charbons sont riches en fluor, et l'excès de fluor qui en résulte dans les aliments et l'eau de boisson provoque des cas de fluorose (figure 8). Par contre, l'iode contenue dans ces charbons à un effet bénéfique dans les bassins houillers en évitant l'IDD (iode deficiency disorder) fréquent dans cette province pauvre en iode hors bassins houillers. On observe en effet que l'utilisation du charbon à la place du bois, l'énergie la plus utilisée, réduit la prévalence de l'IDD. (Finkelman, 36).



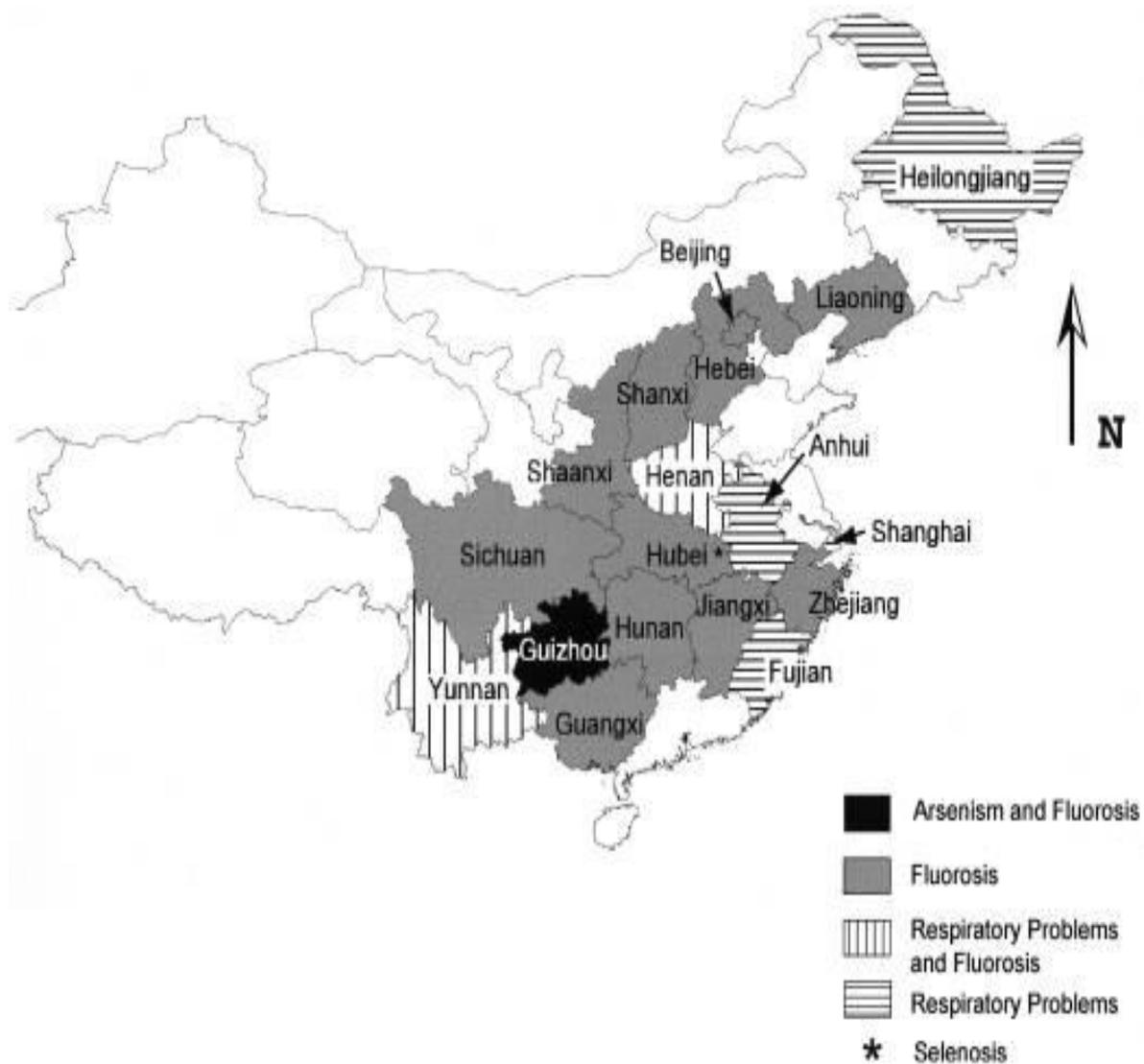
*Figure 7: les méfaits des charbons riches en arsenic en Chine. Le séchage des piments au dessus des poêles à charbon (à gauche) entraîne des arsénioses dont certaines très graves, suivies de cancers (à droite). Source : Finkelman and Bunnell (6)*



*Figure 8: en Chine, beaucoup de charbons sont riches en fluor. L'excès de fluor dans l'alimentation provoque des fluoroses allant jusqu'à des malformations du squelette. Source: Finkelman and Bunnell (6).*

La fluorose affecte aussi d'autres régions charbonnières de Chine. 10 millions de personnes en seraient affectées. La cause première serait due à la consommation de maïs séché sur des poêles à charbon. On observe aussi un excès de cancers de l'oesophage, qui serait dû aux PAH produits par la combustion, et des cas d'empoisonnements par le sélénium, le mercure et le thallium (35) (figure 9)

A Nikitovka en Russie il existe des charbons riches en mercure, source à l'époque soviétique d'une importante pollution au mercure, qui est un toxique nerveux. Les mines sont maintenant abandonnées, mais les morceaux de charbon encore récupérables sur les carreaux de mine ou les terrils sont utilisés pour les usages domestiques (Finkelman 36).



*Figure 9: Provinces chinoises affectées par des maladies liées à l'utilisation du charbon pour le chauffage et la cuisine. Finkelman et al. 35*

**La mortalité différée due à l'utilisation domestique du charbon n'est pas connue avec précision, mais il s'agit probablement de plusieurs centaines de mille par an à l'échelle mondiale, essentiellement à cause des particules et de l'oxyde de carbone émises par des feux en milieu confiné, mais aussi par une contamination de l'alimentation due à des pratiques de séchage au-dessus de poêles à charbon.**

### ***3-2-2 La production d'électricité***

La production d'électricité est de très loin la principale utilisation du charbon actuellement, avec environ 70 % en masse du charbon extrait.

Par TWh électrique (TWhe) produit, une centrale à charbon représentative de la moyenne du parc de centrales mondiales consomme quand il s'agit de «hard coal» environ 400 000 tonnes de charbon, et produit 60 000 tonnes de cendres minérales. Ces quantités sont à peu près à doubler s'il s'agit de lignite.

C'est ainsi que l'on peut estimer par exemple à environ 25 millions de tonnes par an la quantité de cendres minérales produite par les centrales allemandes. Greenpeace-Asia a estimé celles produites annuellement par les centrales chinoises à 375 Mt (37). La plus grande partie de ces cendres reste au foyer de combustion (cendres résiduelles, cendres de foyer, bottom ash), une autre reste sur les filtres à fumées, et une autre va dans l'atmosphère sous forme de cendres volantes (fly ash) très fines. La quantité de cendres volantes dépend de l'efficacité du filtre. Pour les installations les plus modernes, les quantités allant à l'atmosphère sont de l'ordre de la centaine de tonnes par TWhe produit, mais il s'agit alors de particules extrêmement fines, donc particulièrement dangereuses. Ces quantités sont 10 fois plus importantes pour la moyenne du parc mondial de centrales, et encore plus dans les pays émergents comme la Chine et l'Inde, qui utilisent très souvent des technologies anciennes. En ce qui concerne l'Allemagne, on peut estimer que les cendres non arrêtées par les filtres représentent en poids de l'ordre de 200 000 tonnes chaque année, contenant environ 20 tonnes d'éléments hasardeux.

Les filtres ne peuvent arrêter les produits qui se trouvent à l'état gazeux, comme les oxydes de soufre ou d'azote, le mercure ou le radon 222. Les centrales modernes sont donc équipées d'unités de désulfuration (FGD) et de dénitrification (SCR) qui arrêtent les oxydes de soufre ou d'azote, mais pas complètement (figure 10). Il n'existe pas actuellement de procédés industriels pour arrêter le mercure.

Les quantités de SOx et de NOx qui sortent des cheminées des centrales à charbon dans le monde sont de l'ordre de plusieurs centaines de millions de tonnes chaque année, et leurs émissions de mercure représentent à peu près 30 % du total des émissions mondiales.

		Centrale thermique		Cimenterie	Sidérurgie
		Gaz naturel	Charbon Chaudière supercritique (charbon pulvérisé <sup>a</sup> /lit fluidisé circulant <sup>b</sup> )	Voie sèche, en sortie de cheminée avec broyeur vertical	Haut-fourneau conventionnel/avec recyclage du gaz de tête
Capacité		600 MWe	600 MWe	2 300 t/j de clinker	9 700 t/j de fonte chaude
Débit de fumées	Nm <sup>3</sup> /h	3 300 000	1 700 000/1 750 000	250 000	600 000/520 000
Masse volumique	kg/Nm <sup>3</sup>	1,3	1,3	1,3	1,3
Température	°C	95-105	85/120	110	55
Pression	bar	1	1	1	3
Composition :					
CO <sub>2</sub>	% vol.	3,5	13,5	15	20/30
H <sub>2</sub> O	% vol.	7	11/7	6-11	15
N <sub>2</sub>	% vol.	75-80	70/75	65-70	40/8
O <sub>2</sub>	% vol.	13,5	4	8-10	-
H <sub>2</sub>	% vol.	-	-	-	4/7
CO	% vol.	-	10/25	<0,1	20/40
Ar	% vol.	0,02	0,9	0,3	0,5/0,1
CH <sub>4</sub>	% vol.	-	-	-	0,01
Hydrocarbures (C2 à C7)	% vol.	-	-	-	<0,05
NO <sub>x</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>	25-50	200	800	27
SO <sub>x</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>	0-35	150/200	100	3
H <sub>2</sub> S	ppm	-	-	-	3
COS	ppm	-	-	-	8
HCl	ppm	-	4	-	<1
Cl <sub>2</sub>	ppm	-	-	-	<1
NH <sub>3</sub>	ppm	-	<1	-	1
HCN	ppm	-	-	-	38
Poussières	mg/Nm <sup>3</sup>	<5	30	50	<10
Métaux lourds (As, Cd, Cr, Hg, Mn, Ni, Pb, V)	µg/Nm <sup>3</sup>	-	<5 pour chacun	-	-

<sup>a</sup> Gaz issu des traitements suivants : filtration, désulfuration (FGD), SCR pour les NO<sub>x</sub> (Selective Catalytic Reduction).

<sup>b</sup> Gaz issu des traitements suivants : filtration, la désulfuration est faite dans le réacteur par ajout de chaux.

*Figure 10 : composition des fumées relâchées dans l'atmosphère par différents types d'installations industrielles modernes équipées de filtres à fumées. Bien que les teneurs en polluants par m<sup>3</sup> de fumées soient faibles, le volume des fumées est tel que les quantités de polluants sont importantes. Source : Lecomte et al. 2010 (38)*

On observe que le contenu Gaz cendres volantes en éléments minéraux hasardeux croit avec la finesse de leurs particules (figure 11). **Les cendres volantes représentent, avec les particules de sulfates et de nitrates formées secondairement à partir des SOx et**

des NOx le principal danger des centrales à charbon, car la finesse des particules leur permet de pénétrer au plus profond des poumons où elles peuvent provoquer des altérations des tissus et même entrer dans la circulation sanguine. Elles y amènent également les éléments et molécules hasardeux, métaux lourds, goudrons et HAP.

TABLE 25 Effect of Fly-Ash Particle Size on the Concentration of Some Trace Elements (ppm) <sup>a</sup>

Element	Size Range (um)			
	>15	8-15	3-8	<3
As	13.7	56	87	132
Be	6.3	8.5	9.5	10.3
Cd	0.4	1.6	2.8	4.6
Co	8.9	16.3	19	21
Cr	28	49	59	63
Cu	56	89	107	137
Ga	43	116	140	178
Mn	207	231	261	317
Mo	9.1	28	40	50
Ni	25	37	44	40
Pb	73	169	226	278
Sb	2.6	8.3	13	20.6
Se	19	59	78	198
U	8.8	16	22	29
V	86	178	244	327
W	3.4	8.6	16	24
Zn	71	194	304	550

<sup>a</sup> Source: Ondov *et al.* (1979).

Figure 11: Teneurs en éléments hasardeux des cendres volantes des centrales à charbon selon la taille des particules. Source: Finkelman (36)

Les populations riveraines des centrales sont les plus affectées, mais ces cendres peuvent parcourir, du fait de leur finesse, des distances considérables, car ce sont des aérosols. On considère qu'elles contribuent, avec la circulation automobile, les fumées d'autres industries et les feux de bois à la formation de l'Asian Brown Cloud » qui recouvre en permanence des millions de km<sup>2</sup> au-dessus de l'Asie du Sud-Est (39).

La teneur des charbons en uranium, en thorium et en leurs descendants n'est pas négligeable. A.Gabbard

(40) a évalué à environ 0,800 Mt d'uranium et 2 Mt de thorium les quantités contenues dans le charbon qui sera utilisé pour la production d'électricité entre 1940 et 2040. Selon lui, la radioactivité émise dans leur environnement par une centrale à charbon est de l'ordre de 100 fois supérieure à celle émise par une centrale nucléaire (mais il a oublié de dire que dans beaucoup de pays, la production du combustible nucléaire était faite pour une large part grâce à de l'électricité produite par des centrales à charbon). Cela n'en fait semble-t-il pas pour autant une source dangereuse de radioactivité.

L'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) a toutefois pour en avoir le cœur net confié à l'Association Robin des Bois (41) une étude sur la radioactivité naturelle techniquement renforcée en France, comprenant entre autres une enquête sur la radioactivité des cendres et des émissions des centrales de la filière charbon française. La radioactivité totale de l'ensemble des émissions des centrales aurait été en 2000 de l'ordre de 1 TBq par an. Elle est très durable et donc cumulative puisqu'il s'agit d'isotopes à très longue durée de vie, potassium 40, uranium 235 et 238 et thorium 232 et les descendants de ces derniers. Depuis le début de l'utilisation des centrales à charbon, il y a donc eu accumulation de radioactivité sans décroissance sensible, année après année. Notons la possibilité par endroit de la formation de tartres fortement radioactifs dans des conduites. En ce qui concerne les cendres, les données sont peu nombreuses et disparates. Ces cendres sont commercialisées sans suivi radiologique ni précautions particulières. Il y a de nombreux dépôts «historiques» (c'est moins le cas en Allemagne, où la commercialisation des cendres a été beaucoup plus complète qu'en France). Les données existantes ne paraissent pas à première vue inquiétantes, mais une enquête beaucoup plus détaillée est nécessaire.

La teneur en uranium des cendres est de l'ordre de 10 fois plus élevée que celle des charbons, et celle des cendres volantes très fines encore plus : elle est parfois suffisante pour que l'on puisse envisager d'en extraire l'uranium. C'est ainsi que la société canadienne Sparton a préparé du « yellow-cake » à partir de cendres d'un site chinois et a prétendu avoir atteint la rentabilité (42)

### *Les atteintes à l'environnement*

La destinée des cendres récupérables des centrales électriques est la même que celle des stériles ou des boues de lavage de l'exploitation, et les atteintes à l'environnement qui en résultent sont de même nature. Les cendres sont stockées à proximité des centrales dans des bassins de contention ou utilisées sans précautions particulières pour remblayer diverses excavations. Dans les pays de l'OCDE, une grande partie est utilisée comme matériaux par le BTP. Elles se retrouvent dans les bétons des habitations, les infrastructures des immeubles, des parkings, des aéroports et des installations industrielles, ou sont utilisées en remblayage.

Les bassins de contention (ash ponds, slurry ponds), comme pour les boues de lavage, ne sont pas toujours très sûrs. En Décembre 2008 dans le Kentucky aux Etats-Unis, la digue d'un immense bassin de boues de lavage s'est rompue et les habitations proches ont été submergées par les boues stockées (Figure 12). Ce n'est qu'un exemple spectaculaire d'accidents assez fréquents, aux Etats-Unis où il y a un très grand nombre de ces slurry ponds

ou ash ponds, mais aussi ailleurs. D'autre part ces bassins sont rarement vraiment étanches et peuvent alors polluer la nappe phréatique. Les cendres qu'ils contiennent peuvent être érodées et emportées lors de vents violents.



J.Miles Cary/Knoxville News Sentinel, via Associated Press

*Figure 12 : à gauche, après l'accident de 2008 au Kentucky, à droite, bassin de contention de cendres en Chine*

Les cendres volantes finissent par se déposer au sol, parfois après avoir parcouru de grandes distances. Les produits gazeux aussi, après des réactions avec l'environnement, par exemple la formation de particules de sulfates à partir des oxydes de soufre, et la formation de nitrates à partir des oxydes d'azote. Ces émissions peuvent aussi conduire à la formation d'ozone par réactions photochimiques. Le mercure peut produire du méthyl-mercure, toxique nerveux, par réaction avec des produits organiques. Tout cela n'est a priori pas du meilleur effet sur la faune et la flore, les cultures et la santé publique.

### ***Mortalité différée***

Comme dans le cas de l'extraction des charbons, les effets sanitaires de la production d'électricité par les centrales à charbon dus aux éléments minéraux hasardeux, qu'ils soient épanchés par les fumées ou qu'ils soient présents dans les cendres stockées existent, mais ne sont pas faciles à quantifier. Aux Etats-Unis, l'EPA a conclu qu'il n'y avait pas d'évidence formelle d'effets sur la santé des métaux lourds émis par les centrales à charbon, à l'exception du mercure (36). Cette conclusion est vigoureusement contestée par certains (17, 18) Une étude par l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS) de la contamination des sols autour de la centrale de Cordemais en Loire Atlantique par quelques métaux lourds (ainsi que par les émissions de polluants organiques, NOx, SOx, HAP, PCDD (dioxines) et des PCDF (furanés)

etc...) conclut à des risques très faibles (43). Mais il s'agit d'une centrale dont les unités charbon ont été récemment modernisées.

Dans certains cas pourtant, on observe une causalité directe entre une teneur très élevée d'un élément dans les charbons utilisés et une maladie spécifique. C'est ainsi qu'en Tchécoslovaquie, une fréquence anormale de troubles de l'audition (hearing impaired) chez les enfants a pu être reliée à une concentration élevée d'arsenic dans les fumées des centrales à charbon et une production anormale d'anticorps à la présence de béryllium dans les dites fumées (Finkelman, 36). Les émissions de mercure, qui représentent environ 30 % de la totalité des émissions mondiales de mercure, entraînent une mortalité anormale des poissons dans certaines rivières aux Etats-Unis, et y auraient entraîné des malformations du fœtus chez les femmes enceintes (Finkelman 36).

Cependant les effets les plus importants et les plus généraux sur la santé ne sont pas dus aux métaux lourds, mais aux  $PM_{10}$  et aux oxydes de soufre et d'azote produits par la combustion, et **ces derniers plus par les particules secondaires (sulfates, nitrates) et l'ozone troposphérique qu'ils contribuent à former après leur émission que directement.** On peut faire une analogie avec les effets du tabagisme passif.

Depuis 1970, des travaux sans cesse plus précis ont été entrepris en Europe pour évaluer les effets sanitaires des différents modes de production d'électricité. La Commission Européenne a commandité en 1990 le projet ExternE (pour External Costs of Energy) dont les résultats ont été récemment synthétisés par Markandya and Wilkinson (44) dans le journal médical Britannique «The Lancet». Les principes de la méthode utilisée sont schématisés figure 13 : pour chaque polluant on détermine les quantités émises par chaque centrale et on utilise un modèle de dispersion dans l'atmosphère pour estimer l'évolution de ses concentrations en tout lieu en fonction du temps.

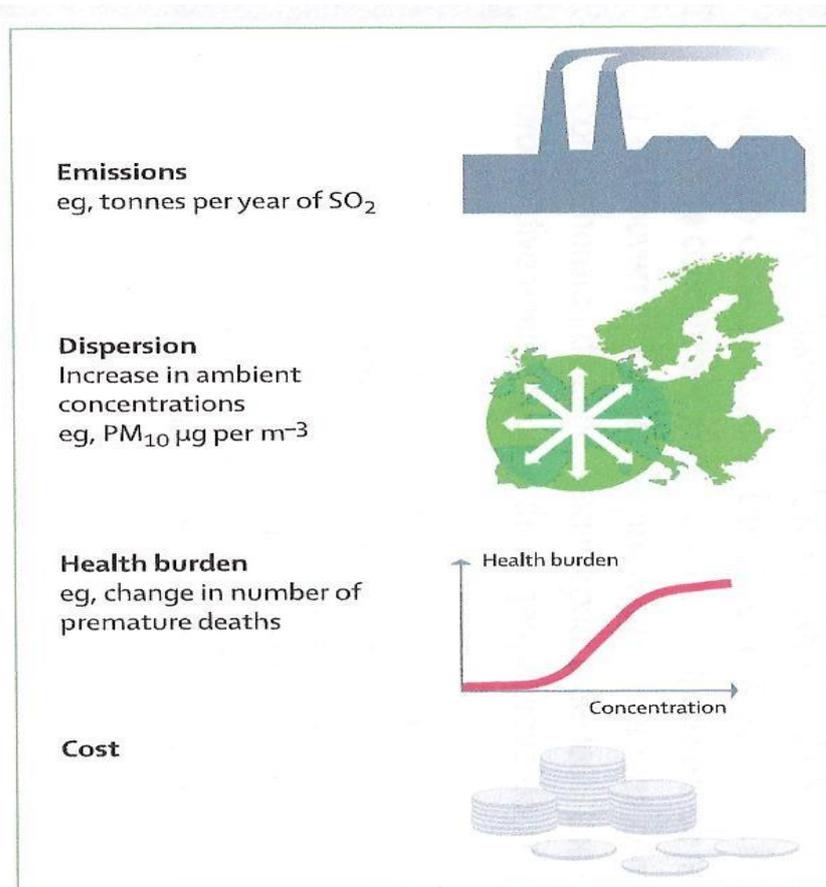


Figure 1 : The effect pathway approach

Figure 13: Schéma de la méthode utilisée par le projet ExternE pour évaluer les effets sanitaires et économiques des différents modes de production d'électricité en Europe (Markandya and Wilkinson, 44).

On évalue ensuite la mortalité prématurée probable selon les connaissances médicales actuelles, mais aussi les effets sur l'agriculture et plus généralement l'activité économique, et les coûts pour la société qui résultent de tout cela. Cet exercice est forcément très imprécis et ne peut aboutir qu'à produire des ordres de grandeur.

**Notons que l'estimation de la mortalité est faite en utilisant une relation linéaire entre cette mortalité et la concentration des polluants dans l'atmosphère. Il vient immédiatement à l'esprit de faire une comparaison avec la relation linéaire utilisée pour évaluer les dangers des radiations nucléaires. Mais une grande différence est que dans le cas des particules, les estimations sont faites dans un domaine de concentration, 20 à 200 µg de particules environ par m<sup>3</sup> d'air, où l'on peut s'appuyer sur des études épidémiologiques ayant constaté cette relation linéaire entre concentration et atteintes à la santé. Il n'y a donc**

**pas d'extrapolation aux faibles doses, inférieures à 10 µg par m3 alors que pour les radiations nucléaires, beaucoup l'utilisent hors de son champ de vérification, c'est-à-dire pour les faibles et très faibles doses pour lesquelles aucune justification épidémiologique ne l'autorise. Un corollaire est que si la pratique dans le domaine des particules était la même que celle de beaucoup dans le domaine du nucléaire, les chiffres de mortalité annoncés seraient beaucoup plus importants !**

Selon Markandya and Wilkinson, on peut estimer en Europe à environ 30 morts en moyenne par TWh produit la mortalité due à l'usage des centrales à charbon et à lignite, dans l'état actuel du parc des centrales. Celle-ci comprend la mortalité due aux accidents et aux maladies professionnelles pour l'ensemble de la filière, relativement faible, et la mortalité différée due à la pollution atmosphérique, qui représente l'essentiel (tableau 4 et figure 14)

	Deaths from accidents		Air pollution-related effects		
	Among the public	Occupational	Deaths*	Serious illness†	Minor illness‡
Lignite <sup>20</sup>	0.02 (0.005-0.08)	0.10 (0.025-0.4)	32.6 (8.2-130)	298 (74.6-1193)	17676 (4419-70704)
Coal <sup>21</sup>	0.02 (0.005-0.08)	0.10 (0.025-0.4)	24.5 (6.1-98.0)	225 (56.2-899)	13288 (3322-53150)
Gas <sup>21</sup>	0.02 (0.005-0.08)	0.001 (0.0003-0.004)	2.8 (0.70-11.2)	30 (7.48-120)	703 (176-2813)
Oil <sup>21</sup>	0.03 (0.008-0.12)	..	18.4 (4.6-73.6)	161 (40.4-645.6)	9551 (2388-38204)
Biomass <sup>21</sup>	..	..	4.63 (1.16-18.5)	43 (10.8-172.6)	2276 (569-9104)
Nuclear <sup>21,22</sup>	0.003	0.019	0.052	0.22	..

Data are mean estimate (95% CI). \*Includes acute and chronic effects. Chronic effect deaths are between 88% and 99% of total. For nuclear power, they include all cancer-related deaths. †Includes respiratory and cerebrovascular hospital admissions, congestive heart failure, and chronic bronchitis. For nuclear power, they include all non-fatal cancers and hereditary effects. ‡Includes restricted activity days, bronchodilator use cases, cough, and lower-respiratory symptom days in patients with asthma, and chronic cough episodes. TWh=10<sup>12</sup> Watt hours.

*Tableau 4: mortalité directe et différée attribuable à la production d'électricité en Europe, par TWh d'électricité produite. Toute la filière, de l'extraction à l'utilisation en passant par le transport, est prise en compte (Markandya and Wilkinson, 44)*

La production des centrales à charbon de l'Europe des 27 étant actuellement d'environ 1000 TWh par an, la mortalité correspondante serait donc de l'ordre

de 30 000 morts par an, dont 10 000 en Allemagne, et environ 1000 en France, pour l'essentiel due à la pollution atmosphérique.

Ces valeurs peuvent être extrapolées aux pays de l'OCDE, dont les centrales sont à peu près au même niveau que celles de l'Europe. Pour une production de 3700 TWh en 2008, la mortalité associée, essentiellement différée, serait donc d'environ 110 000 par an.

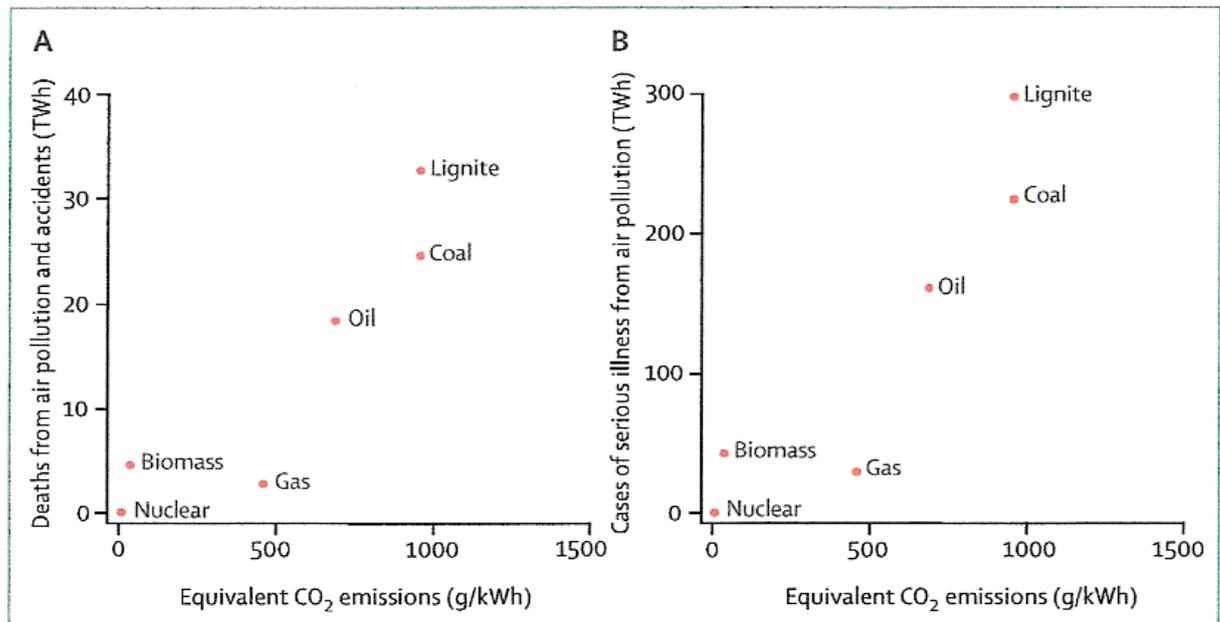
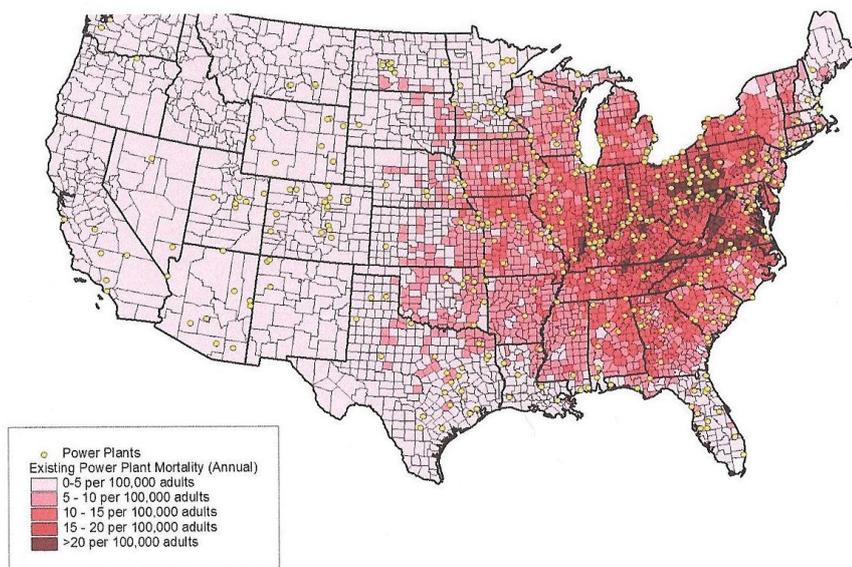


Figure 14 : Mortalité et morbidité induites en Europe par les centrales électriques, par TWh électrique produit (Markandya and Wilkinson, 44)

La figure 15, est une estimation de la mortalité annuelle qui serait due aux centrales à charbon aux Etats-Unis, d'après l'association Clean Air Task Force (45)

Pour les pays non-OCDE, les coefficients à appliquer sont certainement bien supérieurs aux coefficients européens, faute en particulier d'assistance médicale efficace, mais ne sont pas connus faute d'étude approfondie. Si l'on applique les coefficients européens, on obtient, pour une production d'électricité de 4300 TWh une mortalité prématurée de 130 000. Si l'on prend des coefficients 5 fois supérieurs, ce qui paraît un minimum du fait de la très forte pollution par les centrales et du peu d'efficacité des services médicaux dans les zones les plus affectées, à une mortalité différée d'environ 700 000 morts par an, dont 400 000 rien que pour la Chine !



*Figure 15 : Mortalité annuelle estimée due aux centrales à charbon aux Etats-Unis, d'après l'association Clean Air Task Force (45)*

La figure 16, due au Paul Scherrer Institute (PSI, 46), confirme l'ampleur des ravages provoqués par les centrales électriques à charbon en Chine et son extension géographique. Cependant, les valeurs sont ici exprimées en années de vie perdues par rapport à l'espérance de vie et non en morts prématurées.

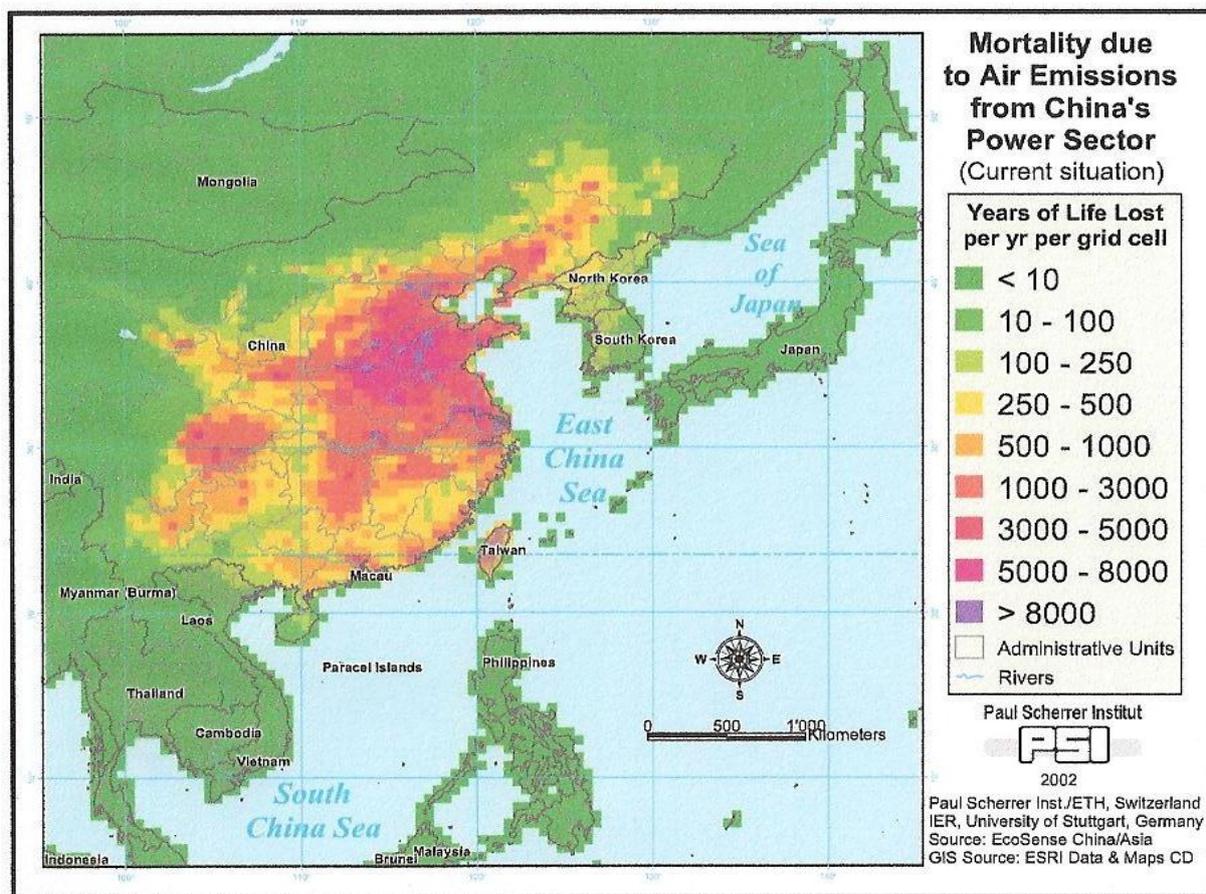


Figure 16: les ravages de la pollution atmosphérique due aux centrales électriques au charbon en Chine, d'après le PSI (46)

Le nombre d'années de vie perdues en Chine du fait des centrales à charbon était évalué en 2006 par le PSI à 9 millions, ce qui pour une production d'alors environ 2500 TWh correspondait à 3600 années de vie perdues par TWh !

La population chinoise âgée de moins de l'espérance de vie moyenne, soit 73 ans environ, étant alors de l'ordre de 1,2 milliard d'habitants, cela correspond à une perte d'espérance de vie moyenne par habitant de  $9 \times 73 / 1200 = 0,54$  année, soit un peu plus de 6 mois.

La figure 17 montre pour l'Europe le nombre d'années de vies perdues par TWh qui serait dû aux différents modes de production d'électricité, selon les résultats du programme ExternE (Rabl et Spadaro, 47). En ce qui concerne les effets des centrales à charbon construites avant 1995, ce nombre serait environ 4 fois plus faible qu'en Chine. Pour celles construites à partir de 2000, il serait 30 fois plus faible.

Si, d'une manière arbitraire en l'absence de données précises sur l'histogramme des âges des centrales, on prend une valeur de 500 années de

vie perdues par TWh pour le parc actuel de centrales en Allemagne, le même calcul que ci-dessus conduit à estimer la perte moyenne d'espérance de vie pour l'Allemagne à environ 1,8 mois.

Cette perte d'espérance de vie ne paraît pas à première vue considérable. Elle l'est bien sûr beaucoup plus si on la rapporte aux seules personnes affectées. Par comparaison avec la figure 14, qui indique une mortalité d'environ 30 morts par TWh pour le mix lignite-charbon qui est caractéristique de l'Allemagne, on peut estimer à 15 ans environ le nombre moyen d'années de vie perdues par personne décédée pour cette cause.

La marge de progrès possible semble très importante, puisque le nombre d'années de vie perdues par TWh pour les centrales construites maintenant en Europe serait de 7 à 8 fois plus faible que pour les centrales construites avant 1995 !

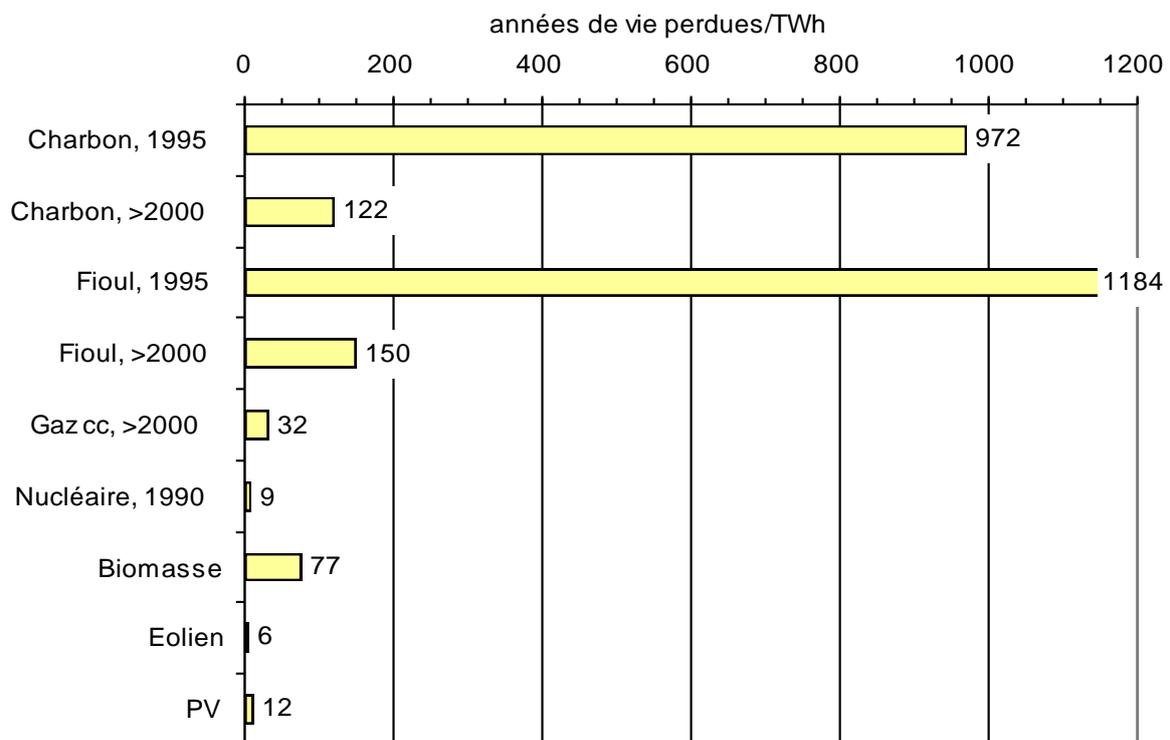


Figure 16 : la mortalité différée due aux différents modes de production d'électricité en Europe, exprimée en nombre d'années de vie perdues par TWh électrique produit. D'après Rabl et Spadaro (47)

### ***Les autres utilisations***

Outre le chauffage domestique et la production d'électricité, le charbon est utilisé pour fournir de l'énergie à l'industrie, à raison d'environ 25 % en masse

des quantités extraites. Les principales industries concernées sont la sidérurgie et la fabrication du ciment.

La sidérurgie a ceci de particulier que l'utilisation du charbon s'y fait en deux temps: il est tout d'abord pyrolysé en absence d'oxygène dans des « cokeries » pour être transformé en coke métallurgique dans des cokeries. Ce coke est ensuite mélangé à du minerai de fer dans des hauts-fourneaux pour produire de la fonte, première étape de la fabrication de l'acier. Il fournit l'énergie nécessaire à la fusion du minerai, mais aussi sa résistance mécanique très importante permet de garder une porosité et d'assurer la circulation de l'oxygène. La pyrolyse du charbon pour produire le coke produit des gaz et des goudrons, ainsi que des composés organiques volatils.

Tableau T.5 : Prévisions des émissions pour les aciéries canadiennes (tonnes)				
Substance	2000 <sup>1</sup>	2005	2010	2015
CO <sub>2</sub>	14 630 000	14 638 000	14 666 000	15 016 000
CO	230 000	242 500	256 000	270 500
SO <sub>x</sub>	16 830	17 440	18 080	18 740
COV	18 490	18 360	18 250	18 610
NO <sub>x</sub>	15 060	15 150	15 270	15 810
PT	3 940	4 110	4 290	4 490
PM <sub>10</sub>	2 200	2 310	2 420	2 540
PM <sub>2,5</sub>	AED	AED	AED	AED
Benzène	586	223	223	202
HAP	156	93	93	78
NH <sub>3</sub>	110	114	118	122
Pb	4,7	5,2	5,8	6,4
Ni	2,0	2,2	2,5	2,7
Cd	0,1	0,1	0,1	0,1
Hg	0,25	0,27	0,29	0,32
HCB <sup>2</sup>	920	500	330	350
Dioxines/furanes <sup>3</sup>	16,6	13,4	6,4	7,0

Nota : AED : aucune estimation disponible.  
<sup>1</sup> Les émissions de Sydney Steel sont incluses pour 2000.  
<sup>2</sup> grammes  
<sup>3</sup> grammes, en quotient de toxicité équivalente international (I-TEQ)

*Tableau 6 : les émissions de polluants de la sidérurgie au Canada, d'après 46*

Le tableau 6 montre pour l'exemple du Canada la variété des polluants produits par l'ensemble des opérations, et leurs proportions relatives. Dans les autres industries, le charbon, comme pour la production d'électricité, est plus simplement une source de chaleur à haute température.

L'incidence sur la santé publique des polluants atmosphériques et des cendres de combustion n'a pas ici fait l'objet d'études aussi détaillées que pour la production d'électricité. On peut estimer en première approximation qu'elle a à

peu près les mêmes effets et qu'il faut donc multiplier de ce fait par 95/70, soit 1,35 environ, la mortalité différée qui est attribuée à la production d'électricité pour obtenir la mortalité différée totale des utilisations industrielles du charbon.

### **Conclusion :**

*Hors effet de serre additionnel, les dangers pour l'environnement et la santé publique de l'usage du charbon sont très importants et multiformes. Entre ceux qui sont dus à l'extraction du charbon, à son utilisation domestique et à son utilisation industrielle, la mortalité induite serait de l'ordre de 1 à 2 millions de morts par an, et les maladies graves en nombre 10 fois plus important ! Encore connaît-on très peu la mortalité et la morbidité induites dans les populations riveraines par la remobilisation des éléments hasardeux contenus par les charbons par les exploitations, ainsi que par les stockages des déchets de l'extraction et des cendres de combustion des installations industrielles, dont le volume se compte chaque année en milliards de m<sup>3</sup>. Des études épidémiologiques approfondies et une surveillance accrue de ces exploitations et stockages sont urgemment nécessaires pour répondre à l'inquiétude croissante des populations riveraines à ce sujet.*

*Tout cela fait du charbon de très loin la plus dangereuse des sources d'énergies utilisées par l'homme. C'est aussi comme on sait celle qui contribue le plus à l'effet de serre additionnel.*

*Cela n'est pas connu du grand public, dont l'inconscient collectif n'a retenu, faute d'être correctement informé sur le sujet par les médias, que les dangers dus aux accidents dans les mines, qui n'en représentent en fait qu'une toute petite partie.*

*La principale cause de mortalité est en fait l'émission de particules extrêmement fines (aérosols) par la combustion du charbon, produites par le chauffage domestique mais en Europe encore plus par les installations industrielles, au premier rang desquels les centrales électriques au charbon. Tous les pays ne sont pas égaux devant ces dangers: la Chine, où le charbon est le moteur du développement économique, il est utilisé en très grandes quantités à marche forcée sans qu'aient été prises les précautions nécessaires pour protéger les mineurs et les populations, comme on le faisait encore en Europe au 19<sup>ème</sup> siècle et pendant la première moitié du 20<sup>ème</sup>. A elle seule elle supporte au moins la moitié de la mortalité mondiale due au charbon.*

*L'Inde n'est guère mieux lotie, mais aussi en Europe des pays comme l'Ukraine ou la Russie. Des améliorations importantes sont toutefois en cours.*

*Les citoyens de l'Europe de l'Ouest et de l'Europe Centrale, et en particulier l'Allemagne, la Pologne et les Pays des Balkans, gros producteurs et consommateurs de lignite, la variété de charbon la plus problématique, auraient tort de se croire à l'abri. Si la sécurité dans les mines y est bien meilleure que dans les pays précités, les dangers pour l'environnement et pour la santé publique y sont très importants. On peut estimer que la mortalité induite rien que par les fumées de centrales électriques au charbon est en Europe des 27 de l'ordre de 30 000 morts par an, dont 10 000 dans la seule Allemagne et 1000 pour la France.*

*Cela n'est pas une fatalité : une surveillance épidémiologique active autour des grandes exploitations, des stockages et des centrales à charbon, et le remplacement accéléré du parc de centrales actuelles, construites pour une grande part il y a plus de 20 ans, par des centrales équipées d'unités de captage d'oxydes de soufre et d'azote et de filtres à fumées beaucoup plus efficaces, réduirait déjà de beaucoup ces dangers, faute de vouloir ou de pouvoir les remplacer par des centrales n'utilisant pas de charbon..*

## **Références et commentaires**

- 1-** De Launay, G., *La conquête minérale*, Paris, 1908.
- 2-** Agence internationale de l'énergie ( AIE) : CO2 emissions from fuel combustion (highlights) 2010 edition. [www.iea.org](http://www.iea.org) .
- 3-** Humique vient du latin humus, qui signifie sol, mais qui désigne en fait les sols riches en matière organique.
- 4-** Le clarke d'un élément, d'après le géochimiste américain F.W.Clarke, est la teneur moyenne pondérale de cet élément dans la croûte terrestre.
- 5-** Finkelman, R.B. and Gross, P.M.K ( 1999) : The type of data needed for assessing the environmental and human health impact of coal. *International Journal of Coal Geology*, 40, 91-101
- 6 –** Finkelman, R.B. and Bunnell, J.E. : Health Impacts of Coal, Short Course A <http://pubs.usgs.gov/of/2004/1283/shortcoursea.pdf>
- 7-** Stach, E., M.Th.Mackowsky, M. Teichmüller, G.H.Taylor, D.Chandra and R.Teichmüller, 1982. *Textbook of Coal Petrology*, 3rd ed., Borntraeger, Berlin. Cet ouvrage est la bible de la pétrographie des charbons.
- 8-** Durand, B., 2007 : *Energie et environnement, les risques et les enjeux d'une crise annoncée*. EDP Sciences
- 9-** Le coke est utilisé pour la fabrication de la fonte dans les hauts fourneaux. Son action est double : D'une part c'est un agent réducteur avec lequel on réduit les oxydes ou les carbonates de fer. D'autre part c'est, de par sa résistance

mécanique, un agent mécanique qui permet la circulation des fluides dans le haut fourneau. C'est la mise au point en 1709 de sa fabrication à partir du charbon des Midlands par Abraham Darby qui a permis l'essor de la métallurgie de l'acier en Angleterre, un des principaux facteurs de la Révolution Industrielle. Les charbons à coke sont les charbons les plus riches en hydrogène de la classe des charbons bitumineux. Portés à haute température (1000 °C et plus) dans des fours à coke, ils fondent partiellement sous forme de ce qu'on appelle une mésophase, sous forme de minuscules vésicules réparties dans la masse du charbon. Ces vésicules deviennent ensuite des pores et il en résulte la création d'un solide très poreux et très résistant mécaniquement. On sait faire maintenant du coke métallurgique à partir de variétés de charbon un peu moins riches en hydrogène, en y ajoutant par exemple des résidus de raffinage du pétrole qui apportent l'hydrogène nécessaire à la fusion partielle.

**10-** IFP Energies nouvelles, 2011 : Le charbon, énergie du 21<sup>ème</sup> siècle ? Les grands débats sur l'énergie.

**11-** van Krevelen, D.W, 1993 : Coal, typology, physics, chemistry, constitution. 3<sup>rd</sup> edition, Elsevier. Cet ouvrage est la bible de la physicochimie des charbons.

**12-** les charbons contiennent de l'hydrogène, qui produit de la vapeur d'eau lors de leur combustion. On distingue donc le pouvoir calorifique supérieur (PCS), qui inclut la chaleur de vaporisation de l'eau, du pouvoir calorifique inférieur (PCI) qui ne l'inclut pas. Ce dernier est la référence, car on ne récupère pas toujours cette chaleur de vaporisation.

**13-** Durand, B., 2009 : La crise pétrolière, analyse des mesures d'urgence. EDP Sciences.

**14-** Rutledge, D., 2007: in "The Coal Question and Climate Change", posted to The Oil Drum by Prof. Goose on June 25, 2007

([www.theoil Drum.com/node/2697](http://www.theoil Drum.com/node/2697))

**15-** Hubbert, M.K.(1982) : Techniques of Prediction as Applied to Production of Oil and Gas, US Department of Commerce, NBS Special Publication 631, May 1982.

**16-** Aleklett, K., 2010: Peak Coal in China.

<http://www.energybulletin.net/stories/2010-11-17/peak-coal-china>

**17-** Lockwood, A. et al., 2009: Coal's Assault on Human Health. Physicians for social responsibility( PSR), November 2009.

<http://www.psr.org/assets/pdfs/psr-coal-fullreport.pdf> .

**18-** Epstein, P.R.et al., 2011 : Full cost accounting for the life cycle of coal in "Ecological Economics Reviews." Robert Costanza, Karin Limburg & Ida Kubiszewski, Eds. *Ann. N.Y. Acad. Sci.* 1219: 73–98.

[http://solar.gwu.edu/index\\_files/Resources\\_files/epstein\\_full%20cost%20of%20coal.pdf](http://solar.gwu.edu/index_files/Resources_files/epstein_full%20cost%20of%20coal.pdf)

**19-** Dones, R. et al., 2007: Life Cycle inventories of Energy Systems : Results for Current Systems in Switzerland and others UCTE Countries. Swiss Center for Life Cycle Inventories, ecoinvent report N°5.

- 20-** Mountain justice: What is Mountain Top Removal Mining?  
<http://mountainjustice.org/facts/steps.php>
- 21-** Deshaies, M., 2003: Mines et énergie en Allemagne: enjeux environnementaux et paysages. Cerpa, Université de Nancy 2, Actes 2003.  
[http://archives-fig-st-die.cndp.fr/actes/actes\\_2003/deshaies/article.htm](http://archives-fig-st-die.cndp.fr/actes/actes_2003/deshaies/article.htm)
- 22-** Calugaru, C., 2006: L'exploitation du lignite et la réhabilitation des paysages dans la région minière d'Olténie en Roumanie. Revue Géographique de l'Est, vol. 46 / 3-4 | 2006 | Réhabilitation et reconversion des espaces industriels et urbains dégradés <http://rge.revues.org/1444>
- 23-** Greenpeace international, 2008: The true cost of coal, how people and the planet are paying the price for the world's dirtiest fuel.  
<http://www.greenpeace.org/raw/content/international/press/reports/true-cost-coal.pdf>
- 24-** Finkelman, R.B.: A global perspective on the health impacts of coal and coal ash: Facts and fallacies.  
<http://www.cprm.gov.br/pgagem/puerto/Israel.pdf>
- 25-** Coup de poussière : les poussières en suspension provenant de l'abattage du charbon dans les mines, peuvent provoquer une déflagration sous l'effet d'une étincelle ou d'une flamme à certaines concentrations dans l'air. Ces coups de poussières peuvent être plus meurtriers que les coups de grisous.
- 26-** Huguenard, P. et al. 1996 : Catastrophes, de la stratégie d'intervention à la prise en charge médicale. Elsevier
- 27-** Hirshberg, S., 2004: Accidents in the Energy Sector: Comparison of Damage Indicators and External costs. Workshop on Approaches to Comparative Risk Assessment, Warsaw, Poland, 20-22 October 2004.  
[http://manhaz.cyf.gov.pl/manhaz/Warsztaty\\_10\\_2004/wp4/Wp4\\_ang/MANHAZ%20Workshop%20Severe%20Accidents%20Hirschberg%20Final.pdf](http://manhaz.cyf.gov.pl/manhaz/Warsztaty_10_2004/wp4/Wp4_ang/MANHAZ%20Workshop%20Severe%20Accidents%20Hirschberg%20Final.pdf)
- 28-** Martin-Amouroux, J-M., 2008: Charbon, les métamorphoses d'une industrie. Editions Technip.
- 29-** Loriaux, F. : Catastrophes minières et traitement de la mort collective durant l'entre-deux guerres <http://www.carhop.be/catas.pdf>
- 30-** Rosental, P-A., 2007: Avant l'amiante, la silicose. Mourir de maladie professionnelle dans la France du XXème siècle. Populations et Sociétés, n°437, Septembre 2007.
- 31-** Rosental, P-A., 2008 : La silicose comme maladie professionnelle transnationale ; RFAS, 2-3, 2008 <http://esopp.ehess.fr/docannexe.php?id=198>
- 32-** Organisation Mondiale de la Santé (OMS), 1986 : Exposition à certaines poussières minérales (silice, charbon) : limites recommandées d'exposition professionnelle à visée sanitaire. Rapport d'un groupe d'étude de l'OMS.  
[http://whqlibdoc.who.int/trs/WHO\\_TRS\\_734\\_fre.pdf](http://whqlibdoc.who.int/trs/WHO_TRS_734_fre.pdf)
- 33-** Baur, X. and Latza, U., 2005: Non-malignant occupational respiratory diseases in Germany in comparison with those of other countries. International Archives of Occupational and Environmental Health ,Volume 78, Number 7,

593-602, DOI: 10.1007/s00420-005-0613-y

<https://springerlink3.metapress.com/content/u002633114502970/resource-secured/?target=fulltext.pdf&sid=ulylcvxepzomqpxwgrft0gtb&sh=www.springerlink.com>

**34-** Organisation mondiale de la Santé (OMS), 2011 : Relever le défi mondial de la pollution atmosphérique, Communiqué de presse, 26 Septembre 2011

[http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2011/air\\_pollution\\_20110926/fr/](http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2011/air_pollution_20110926/fr/)

**35-** Finkelman,R.B., Belkin, H.V., and Baoshan Zheng, 1999: Health impacts of domestic coal use in China.

Proc Natl Acad Sci U S A. 1999 March 30; 96(7): 3427–3431.

<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC34284/>

**36-** Finkelman,R.B.: Health impacts of Coal, should we be concerned?

[http://www.cprm.gov.br/publique/media/Health\\_Impacts\\_Coal.pdf](http://www.cprm.gov.br/publique/media/Health_Impacts_Coal.pdf)

**37-** Greenpeace-East Asia, 2010: Toxic Coal Ash is China's Single Largest Source of Solid Waste. Press release - 2010-09-15

<http://www.greenpeace.org/eastasia/press/releases/climate-energy/2010/coalash-en-pr/>

**38 –** Lecomte, F., Broutin, P., Lebas, E., 2010: Le captage du CO<sub>2</sub>, des technologies pour réduire les émissions de gaz à effet de serre. Editions Technip

**39-** Science Netlinks, 2008: Asian Brown Cloud.

[http://www.sciencenetlinks.com/sci\\_update.php?DocID=82](http://www.sciencenetlinks.com/sci_update.php?DocID=82)

**40-** Gabbard, A., 1993: Coal Combustion, Nuclear Resource or Danger? Oakridge National Laboratory Review (ORNL) - Summer/Fall 1993 v.26, n.3&4, 1jul1993 <http://www.mindfully.org/Energy/Coal-Combustion-Waste-CCW1jul93.htm>

**41-** Association Robin des bois, 2005: La Radioactivité Naturelle Technologiquement Renforcée, Décembre 2005,

[www.robindesbois.org/dossiers/rad\\_nat techno.pdf](http://www.robindesbois.org/dossiers/rad_nat techno.pdf)

**42-** The Economist, April 8<sup>th</sup>, 2010: Novel sources of uranium: Rising from the ashes: Coal ash, fertiliser and even seawater may provide nuclear fuel.

[http://www.economist.com/node/15865280?story\\_id=15865280](http://www.economist.com/node/15865280?story_id=15865280)

**43-** Boudet, C. et al., 2003: Evaluation de l'impact sur la santé des rejets atmosphériques des tranches charbon d'une grande installation de combustion , cartographie des risques. INERIS

[http://www.ineris.fr/centredoc/boudet\\_2003.pdf](http://www.ineris.fr/centredoc/boudet_2003.pdf)

**44-** Markandya,A. and Wilkinson, P.: Energy and Health 2 -Electricity generation and health. Lancet 2007; 370: 979–90.

[http://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736\(07\)61253-7/fulltext#article\\_upsell](http://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736(07)61253-7/fulltext#article_upsell)

**45-** Clean Air Task Force, 2010: The Toll from Coal, an Updated Assessment of Death and Disease from America Dirtiest Energy Source, September 2010.

[http://www.catf.us/resources/publications/files/The\\_Toll\\_from\\_Coal.pdf](http://www.catf.us/resources/publications/files/The_Toll_from_Coal.pdf)

**46-** Paul Scherrer Institute (PSI): De l'énergie propre pour la Chine. Le point sur l'énergie, n°17, Novembre 2006. <http://www.psi.ch/info/le-point-sur-lenergie>

**47-** Rabl.A. et Spadaro, J.V., 2001: Les coûts externes de l'électricité . *Revue de l'Energie*, No.525, mars-avril 2001, p.151-163.

[http://sfp.in2p3.fr/Debat/debat\\_energie/websfp/CoutsExternesElectricite.htm](http://sfp.in2p3.fr/Debat/debat_energie/websfp/CoutsExternesElectricite.htm)

**48-** Charles Napier Company, 2002: Fondements des analyses de la réduction des émissions de plusieurs polluants (FARREP) pour le secteur de la sidérurgie : rapport sommaire pour Environnement Canada et le Conseil canadien des ministres de l'environnement ( CCME), 11 Septembre 2002

[http://www.ccme.ca/assets/pdf/iron\\_steel\\_summary\\_meraf\\_f.pdf](http://www.ccme.ca/assets/pdf/iron_steel_summary_meraf_f.pdf)

### *Lectures complémentaires*

Michel, J.H.: Status and impacts of the German lignite industry. Air pollution and climate series n°18, 2009. The Swedish NGO Secretariat on Acid Rain.

<http://www.heuersdorf.de/apc18.pdf>

Institut de veille sanitaire, (InVS) : Effets cardio-vasculaires de la pollution atmosphérique : mécanismes physiopathologiques. EXTRAPOL, n°32, Septembre 2007.

<http://www.invs.sante.fr/publications/extrapol/32/Extrapol%2032%20bd.pdf>

Declercq, C., 2010: Pollution atmosphérique (2), données épidémiologiques. Institut français de veille sanitaire (InVS) , 10 Décembre 2010.

[http://www.centres-](http://www.centres-antipoison.net/paris/DIU_Tox_Med/2010_2011/cours/C_Declercq_Pollution_atmosphérique_2_DIU_Tox_Med_2010_2011.pdf)

[antipoison.net/paris/DIU\\_Tox\\_Med/2010\\_2011/cours/C\\_Declercq\\_Pollution\\_atmosphérique\\_2\\_DIU\\_Tox\\_Med\\_2010\\_2011.pdf](http://www.centres-antipoison.net/paris/DIU_Tox_Med/2010_2011/cours/C_Declercq_Pollution_atmosphérique_2_DIU_Tox_Med_2010_2011.pdf)

Bruce N., Perez-Padilla R., Albalak R., 2000. Indoor air pollution in developing countries : a major environmental and public health challenge. *Bulletin World Health Organization*, 78, 1078-1092.

[http://www.who.int/bulletin/archives/78\(9\)1078.pdf](http://www.who.int/bulletin/archives/78(9)1078.pdf)

Hsien-Ho Lin, Megan Murray, Ted Cohen, Caroline Colijn, Majid Ezzati, 200\_ : Effects of smoking and solid-fuel use on COPD, lung cancer, and tuberculosis in China: a time-based, multiple risk factor, modelling study. *The Lancet*, Volume 372, Issue 9648, Pages 1473 - 1483, 25 October 2008.

[http://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736\(08\)61345-8/abstract](http://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736(08)61345-8/abstract)

Selinus,O., Finkelman, R.B., Centeno, J.A. : *Medical Geology: A Regional Synthesis*. Springer 2010

[http://books.google.fr/books?id=BDZStwE2AXkC&dq=Iodine%2C%20coal%2C%20health&source=gbs\\_similarbooks](http://books.google.fr/books?id=BDZStwE2AXkC&dq=Iodine%2C%20coal%2C%20health&source=gbs_similarbooks)

Earthjustice, 2009: Waste Deep, Filling mines with Coal Ash is Profit for the Industry But Poison for People.

[http://earthjustice.org/sites/default/files/library/reports/earthjustice\\_waste\\_deep.pdf](http://earthjustice.org/sites/default/files/library/reports/earthjustice_waste_deep.pdf) .

Declercq, C. et Prouvost, H., 2007 : Evaluation de l'impact des rejets atmosphériques des centrales thermiques du Nord-Pas-de-Calais sur l'exposition de la population aux particules en suspension : éléments de faisabilité.

Observatoire Régional de la Santé Nord-Pas-de-Calais, Décembre 2007

[http://www.orsnpdc.org/etudes/148804\\_107-9.pdf](http://www.orsnpdc.org/etudes/148804_107-9.pdf)

Rabl, A., et Spadaro, J., 2005: Les coûts externes de l'électricité. In « L'énergie de demain, techniques, environnement, économie », Bobin, J.L., Huffer, E. et Nifenecker, H. eds, 2005, p. 583-607. EDP Sciences.

## *Annexe*

### *Les produits chimiques trouvés dans les boues de lavage du charbon*

#### **Eléments chimiques hasardeux trouvés dans le charbon.**

Aluminium, antimoine, arsenic, baryum, béryllium, cadmium, calcium, chrome, cobalt, le cuivre;

fer; plomb; magnésium; manganèse; mercure; molybdène; nickel; potassium; sélénium; argent;

sodium; strontium; étain; vanadium; zinc.

#### **Produits chimiques utilisés pour laver le charbon.**

Aniline; Acénaphène; Naphtylène; Anthracène; Benzidine; Benzo (a) anthracène; Benzo (a) pyrène;

Benzo (b) fluoranthène; Benzo (ghi) pérylène; Benzo (k) fluoroanthène; Alcool benzylique; Bis (2 -

éthylhexyle; Bis (2-chloroéthoxy)-méthane; Bis (2-chloroéthyl) éther;

Bis (2-chloroisopropyl) éther; Phtalate; Chrysène; Dibenz (a,h) anthracène; Dibenzofurane;

Phtalate de dibutyle; Diéthyle phtalate ; Diméthyle phtalate; Dioctylphtalate; Fluoranthène; Fluorène;

Hexachlorobenzène; Hexachloroéthane; Indéno (1,2,3-c, d) pyrène; Isophorone; N-nitrosodi-n-

propylamine, N-nitrosodiphénylamine; Naphtalène; Nitrobenzène; Phénanthrène; Pyrène;

Acrilamide; Hexachloro-1,3-butadiène;

Hexa-Cl-1,3-cyclopentadiène; 1,2,4-Trichlorobenzène; 1,2-Dichlorobenzène,  
1,3-Dichlorobenzène, 1,4 -  
Dichlorobenzène, 2,4-Dinitrotoluène; 2,6-Dinitrotoluène; 2-Chloronaphtalène;  
2-Methylnaphtalène; 2 -  
Nitroaniline; 3,3-Dichlorobenzidine; 3-Nitroaniline;  
4-Bromophényl-éther de phényle, 4-Chloroaniline; Ether de phényle ; 4-  
Chlorophényl; 4-Nitroaniline;

***D'après la Division de l'Eau du Kentucky. DOW-DES analytique des données de fichiers.***

Fichier électronique: Martin Co.Coal.Co.Slurry Release DATA.XLS

Voir aussi [http://www.sludgesafety.org/what\\_me\\_worry.html](http://www.sludgesafety.org/what_me_worry.html) .