



## Les combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel...)

**B.DURAND**

### Résumé

Les combustibles fossiles sont les produits d'une très lente transformation au cours des temps géologiques de débris d'organismes accumulés dans certains sédiments. Riches en carbone et en hydrogène, leur combustion produit de la chaleur, à raison d'environ 16 kWh par kg pour le gaz naturel, 12 pour le pétrole, et 4 à 8 pour le charbon selon les qualités. On en tire, par raffinage et autres traitements, des produits utilisables pour fournir de la chaleur domestique ou industrielle, ou bien transformée en énergie mécanique ou en électricité dans des convertisseurs, moteurs ou centrales électriques.

Les combustibles fossiles fournissent actuellement un peu plus de 80 % de l'énergie primaire mondiale. Leur consommation, en premier lieu celle du pétrole, sera obligée de décroître au cours de ce siècle pour raison d'épuisement des gisements. Le fonctionnement des sociétés très consommatrices en sera profondément perturbé si elles sont incapables de les relayer à temps par d'autres sources d'énergie.

L'usage des combustibles fossiles est responsable de 82% des émissions anthropiques actuelles de CO<sub>2</sub> (charbon 35%, pétrole 31%, gaz 16%). Il est également responsable de nombreux accidents graves et de pollutions de l'eau et de l'air préoccupantes pour la santé publique et les écosystèmes. En particulier, le charbon est de très loin la plus dangereuse des énergies utilisées par l'homme, avec 1 à 2 millions de morts provoquées chaque année dans le monde, dont la moitié environ due à la pollution atmosphérique par les centrales électriques au charbon. Les déchets solides de son exploitation et de son utilisation se comptent en centaines de millions de tonnes chaque année.

### I- Formation, variétés, utilisations, contenu énergétique

Les combustibles fossiles ont tous leur origine dans la très lente transformation au cours des temps géologiques des débris organiques (les kérogènes) contenus dans certains sédiments. Riches en carbone et en hydrogène, leur combustion produit de la chaleur, utilisée comme telle ou transformée en énergie mécanique ou en électricité. Ils fournissent environ 82 % de la consommation mondiale d'énergie primaire, et cette proportion est encore plus importante dans beaucoup de pays industrialisés ou en voie d'industrialisation rapide. Grâce au nucléaire, cette part n'est en France que de 50 % environ.

Dans la comptabilité internationale, production et consommation d'énergie s'évaluent en tonne-équivalent-pétrole (tep), quantité d'énergie fournie par une tonne de pétrole de qualité standard, soit 41,86 GJ (11,630 MWh) selon l'Agence Internationale de l'énergie (AIE).

## *Formation*

Tous les combustibles fossiles se sont formés à partir de kérogènes, c'est-à-dire de débris d'organismes (surtout d'algues unicellulaires, de bactéries et de végétaux terrestres) plus ou moins altérés, préservés dans des sédiments argileux et argilo-calcaires (marnes). Ces sédiments se sont accumulés dans de vastes dépressions de l'écorce terrestre envahies par les eaux, les bassins sédimentaires.

Un bassin sédimentaire peut être comparé à un immense réacteur physicochimique alimenté par le haut par des sédiments. Il s'approfondit et se déforme très lentement au cours des temps géologiques. Une « inversion tectonique » met ensuite fin à l'approfondissement et fait remonter les sédiments accumulés vers la surface, où ils s'érodent. Ce qui reste du bassin devient alors un bassin fossile.

Les réactions qui s'y déroulent sont extrêmement lentes à l'échelle humaine, mais, du fait de leurs énormes durées, leurs effets finissent par être sensibles.

Si un sédiment contient du kérogène, ce dernier s'enfouit lentement et est soumis à des températures croissantes: il se dégrade progressivement sous l'effet de la chaleur, en l'absence d'oxygène puisqu'il n'y en a que très peu sous forme libre dans les sédiments, c'est ce qu'on appelle une pyrolyse. Les kérogènes contiennent principalement des atomes de carbone, d'hydrogène et d'oxygène, et accessoirement de soufre et d'azote, dont les proportions varient selon la biomasse dont ils sont issus et les transformations subies dans les sédiments <sup>(1)</sup>. Au cours de cette pyrolyse, ils perdent progressivement la majeure partie de leur oxygène, puis de leur hydrogène, et le kérogène résiduel s'enrichit donc en carbone. Ce processus est appelé carbonification ou maturation. Les produits formés sont d'abord du gaz carbonique et de l'eau, puis du pétrole, et enfin du gaz naturel. Pétrole et gaz naturel sont expulsés du sédiment à kérogène, on l'appelle alors roche-mère, par les fortes pressions qui y règnent pour aller envahir des roches poreuses et perméables appelées réservoirs. Mais l'essentiel du pétrole et du gaz se disperse dans la série sédimentaire et finit avec le temps par se retrouver à la surface du bassin. Une partie en reste également dans la roche-mère. Ce qui subsiste du kérogène initial, c'est-à-dire le résidu solide de cette pyrolyse naturelle, reste bien sûr dans la roche-mère.

Les réservoirs sont le plus souvent des grès ou des carbonates poreux ou fissurés. Pétrole et gaz s'y accumulent progressivement, donnant ainsi naissance aux futurs gisements de pétrole et de gaz.

Tous les gisements de combustibles fossiles se sont formés de cette façon <sup>(1)</sup>. Leur vitesse de formation a été de 4 à 5 ordres de grandeur plus faible que la vitesse à laquelle nous les consommons : nous finirons probablement d'ici la fin de ce siècle à en épuiser l'essentiel du stock récupérable, lequel a mis des dizaines de millions d'années à se constituer.

### *Les variétés de combustibles fossiles :*

Les principaux combustibles fossiles sont le charbon, le pétrole, le gaz naturel et leurs variétés. Il existe aussi ce qu'on appelle les schistes bitumineux :

- Les charbons sont des sédiments très riches en kérogène, 40 % de leur poids sec et plus. Leur kérogène, particulièrement riche en oxygène, est issu essentiellement de débris de végétaux terrestres (arbres, plantes herbacées) accumulés dans des environnements sédimentaires très

spécifiques, en particulier des deltas marécageux de fleuves situés dans des régions à très forte productivité végétale.

On les classe à l'aide de critères physico-chimiques selon les stades successifs de transformation, dits de houillification, qu'ils ont atteint au cours de la carbonification : le stade tourbe désigne les charbons n'ayant pas ou très peu été enfouis. On y reconnaît encore à l'œil nu des restes végétaux. Viennent ensuite les stades lignite, charbon subbitumineux, charbon bitumineux, puis anthracite, par ordre de houillification croissante.

On trouve les charbons dans des bassins houillers dont la profondeur peut atteindre plusieurs kilomètres, sous formes de veines dont l'épaisseur varie de la dizaine de centimètres à plusieurs dizaines de mètres et l'extension de la centaine de mètres à la dizaine de kilomètres. Ces veines alternent avec des argilites contenant, mais en bien moindre proportion, un kérogène de même nature que celui des charbons, et avec d'autres sédiments, le plus souvent des grès. Leur exploitation se fait en mine souterraine jusqu'à des profondeurs maximales de 1500 mètres environ, et pour les gisements dont la profondeur ne dépasse pas 200 à 300 mètres, très fréquemment à ciel ouvert (en découverte). Après leur extraction, les charbons doivent être débarrassés au maximum des débris de leurs roches encaissantes (les épontes) qui sont extraits en même temps qu'eux. Cette opération se fait par broyage et lavage. Elle utilise beaucoup d'eau et de produits chimiques. Malgré cela, le charbon commercialisé contient en moyenne 15 % de son poids en cendres, c'est-à-dire de minéraux incombustibles. L'essentiel provient, non pas des épontes, mais de minéraux intimement mêlés au kérogène.

On songe, mais on n'a pas dépassé le stade du pilote jusqu'à présent, à exploiter les veines de charbon non exploitables, parce qu'elles sont trop profondes ou de trop faible épaisseur, par gazéification souterraine, c'est-à-dire en y pratiquant des forages horizontaux, puis en y injectant de l'oxygène et de la vapeur d'eau à haute température. On pourrait ainsi produire à partir du gaz formé, composé pour l'essentiel de monoxyde de carbone et d'hydrogène, de l'énergie ou des carburants synthétiques, ou encore des molécules, méthanol, ammoniac..., utilisables pour les synthèses chimiques. Cette méthode est pour l'instant très coûteuse, et ses risques environnementaux très mal évalués.

- Les pétroles et les gaz naturels exploitables sont des fluides formés dans des roches-mères et généralement accumulés dans des roches-réservoirs de forte perméabilité. Les pétroles contiennent surtout des hydrocarbures liquides, c'est-à-dire des molécules composées uniquement de carbone et d'hydrogène ayant un nombre d'atomes de carbone supérieur à 4, mais aussi en proportions très variables des résines et des asphaltènes, composés organiques de haut poids moléculaire contenant également du soufre, de l'oxygène et de l'azote, éléments qu'il faut éliminer lors du raffinage. Les gaz naturels contiennent des hydrocarbures qui sont gazeux une fois à la surface, méthane (CH<sub>4</sub>) principalement, accompagné en plus faibles quantités d'hydrocarbures ayant de 2 à 4 atomes de carbone, mais aussi en proportions variables du gaz carbonique, de l'azote, de l'hydrogène sulfuré, parfois un peu d'argon ou d'hélium, et même des traces de composés de mercure ou d'arsenic.

Pétrole et gaz naturel sont fréquemment associés dans un même réservoir, et y forment souvent des phases distinctes, en fonction des conditions thermodynamiques du réservoir : une phase pétrole contenant du gaz dissout (dit gaz associé) et une phase gaz moins dense, contenant du pétrole dissout, située au-dessus, le tout se trouvant au-dessus d'une phase eau appelée aquifère. Il existe aussi des gisements de pétrole sans gaz associé, et de gaz sans pétrole associé (gaz «sec»)

Leur exploitation se fait par forage de puits. La productivité d'un puits dépend de la vitesse d'écoulement, elle-même gouvernée par la perméabilité de la roche-réservoir au pétrole ou au gaz et par la différence de pression entre le réservoir et la surface. Pour maintenir la pression du pétrole dans le réservoir, on doit injecter de l'eau dans l'aquifère.

Il s'agit là de ce qu'on appelle le pétrole et le gaz conventionnels. Il existe des variétés de pétrole et de gaz dits non conventionnels :

- Les pétroles dits extra lourds (bitumes, huiles extra lourdes) contenus pour une très large part dans les sables bitumineux (tar sands) de l'Athabasca au Canada, ou dans les gisements peu profonds de la Ceinture bitumineuse (Faja bituminosa) de l'Orénoque au Venezuela, se trouvent dans des gisements portés à la surface ou à son voisinage à la suite d'une inversion tectonique. Ils ont été altérés par l'oxygène dissous dans les eaux de surface et par des microorganismes. Ces pétroles sont plus riches en oxygène et beaucoup plus visqueux que les pétroles conventionnels, et sont donc de moindre valeur et beaucoup plus difficiles à exploiter. Au Canada, une partie en est extractible par des exploitations minières à ciel ouvert, qui sont, ainsi que les techniques subséquentes de séparation des bitumes de leur gangue minérale, très polluantes et très destructrices des paysages. Une autre partie est exploitée par forages horizontaux et injection de vapeur pour en diminuer la viscosité. Au Venezuela, les huiles dites extralourdes se trouvent accumulées sous des bouchons de bitumes formés dans les réservoirs par la dégradation du pétrole.

- Le pétrole et le gaz contenus dans des réservoirs de très faible perméabilité (tight) ou restés dans leurs roches-mères, que l'on ne peut exploiter que par forage horizontal suivi d'une fracturation hydraulique.

Le terme huile de schistes est utilisé, mais à tort comme on le verra plus loin, pour désigner du « pétrole de roche-mère » récupérable dans des roches-mères, c'est-à-dire des roches à kérogène ayant produit naturellement du pétrole, mais ne l'ayant pas totalement expulsé. En fait, ce pétrole ne se trouve d'ailleurs pas au sein des roches-mères proprement dites, mais dans des roches-réservoirs de faible épaisseur et très faible perméabilité (tight) situées au sein de certaines roches-mères ou à leur contact immédiat.

Le gaz de schistes se trouve quant à lui dans des roches-mères ayant produit du gaz, mais ne l'ayant pas complètement expulsé. Ce gaz est parfois récupérable par forage horizontal et fracturation hydraulique lorsque la roche-mère contient des niveaux relativement perméables (microfissures, granulométrie plus forte...), et constitue maintenant aux Etats-Unis un apport important à la production de gaz naturel. Quand la roche-mère est du charbon, on parle de gaz de veines de charbon (en Anglais CBM pour coal bed methane).

Pétroles et gaz ne peuvent être commercialisés directement à la sortie des puits, car il faut les séparer de l'eau et des boues extraites en même temps qu'eux et aussi en éliminer des composés indésirables tels que le gaz carbonique, l'azote ou l'hydrogène sulfuré. D'autre part, la variété des poids moléculaires de leurs constituants amène à les séparer en diverses catégories pour en permettre le transport. Le gaz contient fréquemment, outre du méthane et un peu d'éthane qui seront transportés par gazoduc ou, après liquéfaction, par navire méthanier (gaz naturel liquéfié, GNL), du propane et du butane que l'on liquéfie sous forme de gaz de pétrole liquéfié (GPL), et des hydrocarbures liquides. Tout cela fait l'objet de ce qu'on appelle le traitement sur champ.

GPL et hydrocarbures liquides extraits du gaz naturel sont comptabilisés dans le pétrole non conventionnel sous la rubrique liquides de gaz naturel (LGN).

Les statistiques internationales des quantités produites se font en tonne (métrique) pour le charbon, en baril pour le pétrole <sup>(2)</sup>, et en mille m<sup>3</sup> dans les conditions normales (N.m<sup>3</sup>) ou en millions de British Thermal Units (MBTU, 1 BTU= 1055 joules) pour le gaz naturel.

- Les schistes bitumineux sont des roches peu profondes très riches en kérogène, exploitables à ciel ouvert, qui n'ont jamais été portées à des profondeurs suffisantes pour avoir produit naturellement du pétrole ou du gaz. On les pyrolyse dans des fours à des températures de 500 à 800 °C, donc bien supérieures aux températures régnant dans les bassins sédimentaires, pour produire artificiellement de l'huile de schistes, un simili pétrole de mauvaise qualité, à partir du kérogène qu'ils contiennent. C'est une ressource potentiellement considérable, en particulier aux Etats-Unis (Green River Shales), mais les procédés actuels d'exploitation ne sont pas économiques, et sont très polluants.

### *Utilisations*

A l'échelle mondiale, les charbons ont trois utilisations principales: en % poids, la production d'électricité (70 %), la fabrication du coke métallurgique servant à produire l'énergie nécessaire à la fabrication de la fonte dans les hauts-fourneaux (15%), et le chauffage domestique (5%), ce dernier essentiellement dans les pays d'Asie, Chine et Inde en particulier. Le reste est utilisé par diverses industries comme combustible pour fournir de la chaleur à haute température.

Les principales utilisations du pétrole sont, après raffinage, en % poids : à 65 % les carburants (essence et gazole pour les véhicules, kérosène pour les avions, fioul lourd pour les bateaux), à 22% les combustibles (dont 15% le fioul domestique pour le chauffage et 7% le fuel lourd pour la production de chaleur industrielle et la production d'électricité), et à 8% les bases de synthèse pour la pétrochimie. Le reste consiste en bitumes routiers, solvants etc... Ces différents produits sont fabriqués dans des raffineries à partir du pétrole brut.

Celles du gaz naturel sont principalement la production d'électricité (40 %), les combustibles pour le chauffage domestique et la cuisine (28%) et la production de chaleur pour l'industrie (22 %), le reste étant utilisé comme matière première ou source d'énergie pour fabriquer les engrais et divers produits chimiques et aussi comme carburant sous forme du gaz naturel véhicule (GNV) utilisé par les voitures à gaz.

### *Contenu énergétique*

L'énergie produite est la chaleur dégagée par oxydation par l'oxygène de l'air du carbone et de l'hydrogène qu'ils contiennent.

La comptabilité à grande échelle des productions d'énergie se fait en tonne-équivalent-pétrole (tep). Une tep est l'énergie dégagée par la combustion d'une tonne de pétrole. Cette quantité pouvant varier assez sensiblement d'un pétrole à l'autre, elle a été fixée arbitrairement à une valeur moyenne de 41,86 milliards de joules (GJ), ou encore 11,630 MWh.

En 2008, la consommation mondiale d'énergie primaire était d'environ 12 milliards de tep (Gtep), dont 81,7 % provenait des combustibles fossiles : 34% pour le pétrole, 20,9 % pour le gaz naturel et 27 % pour le charbon (tableau). Cette consommation a depuis augmenté à un rythme de l'ordre de 1% en moyenne annuelle, sans que varie beaucoup la proportion de la contribution totale

des combustibles fossiles. Par contre, la proportion de gaz naturel et surtout celle de charbon a augmenté, au détriment de celle du pétrole. D'autre part, la consommation de la Chine a beaucoup augmenté, la faisant passer au premier rang des consommateurs de combustibles fossiles.

Pays	Consommation 2008 ( Mtep)		Consommation (% énergie primaire)		pétrole		gaz		charbon		total	
	pétrole	gaz	charbon	total	pétrole	gaz	charbon	total	pétrole	gaz	charbon	total
Monde	4066	2500	3230	9800	34	20,9	27	81,7				
Etats-Unis	866	512	532	1910	38,9	23	23,9	85,8				
EU 27	694	495	350	1540	34,5	24,6	17,4	76,5				
Chine	355	59	1304	1718	18,1	3	66,5	87,6				
Japon	200	72	102	374	44,8	16,2	22,9	83,9				
Inde	166	41	300	507	23,3	5,7	42,1	71,1				
Corée du Sud	124	44	87	255	39,5	14	27,7	81,2				
Allemagne	113	83	86	282	31,4	23	24	78,4				
Brésil	95	21	14	130	39,1	8,7	5,6	53,4				
Italie	94	50	19	163	46,6	25	9,4	81				
France	88	41	14	143	31	14,3	4,8	50,1				
Royaume-Uni	84	105	66	255	32,6	40,7	17,3	90,6				
Espagne	76	41	16	133	46,6	25	9,6	81,2				

Tableau 1: Les 11 pays les plus consommateurs de pétrole en 2008, classés par importance décroissante de leur consommation, avec la part des trois principaux combustibles fossiles dans leur consommation d'énergies primaires. A eux seuls, ils consomment 56% de la production mondiale de pétrole. En rouge les pays émergents les plus consommateurs. De tous ces pays, c'est la France qui a la plus faible proportion de combustibles fossiles dans son approvisionnement énergétique (50,1%), grâce au nucléaire. Source: Agence Internationale de l'Energie (AIE).

Si l'énergie contenue par tonne de combustible commercialisé varie assez peu pour le pétrole autour de 1 tep par tonne, ou pour le gaz autour de 1,3 tep/ tonne, il n'en est pas de même pour le charbon, où elle varie considérablement selon le stade de houillification, mais aussi l'origine et la teneur en cendres : sur produit sec, en moyenne environ 0,25 tep/ tonne pour la tourbe, 0,35 pour le lignite, 0,45 pour le charbon subbitumineux, 0,65 pour le charbon bitumineux et l'anhracite. La moyenne de la production mondiale 2010 (6,5 Gt) est de 0,5 tep/tonne, et 0,6 tep/t en moyenne pour le charbon-vapeur, mélange en quantités variables de variétés de charbon utilisé en particulier pour produire l'électricité.

### Notes et références

1- Durand, B. (1987) : Du kérogène au pétrole et au charbon : les voies et les mécanismes des transformations des matières organiques sédimentaires au cours de l'enfouissement. Mém.Soc.Géol.France, n.s., n°151, p.77-95

2- Il est beaucoup plus facile de mesurer le volume du pétrole à la sortie d'un puits que sa masse. On utilise pour cela une unité de volume anglo-saxonne, le baril, qui vaut 159 litres. Pour calculer une masse, il faut connaître la densité, et pour calculer la valeur énergétique, le contenu énergétique par unité de masse. En moyenne, il faut 7,3 barils pour faire une tep. 1 million de barils par jour équivaut à environ 50 millions de tonnes par an.

---

## II- Emissions de gaz à effet de serre, économie, perspectives d'avenir

Les combustibles fossiles sont les principaux responsables des émissions de gaz à effet de serre et donc de l'augmentation de température de la surface terrestre que nous observons depuis la fin du 19<sup>ème</sup> siècle.

Dans les grands pays industriels, ils fournissent l'essentiel de l'énergie nécessaire à la fabrication des biens de consommation. C'est dire leur importance économique et stratégique ! La diminution prévisible avant la fin du siècle de leur disponibilité, en premier lieu le pétrole, puis le gaz naturel, et enfin le charbon, est préoccupante pour l'avenir des pays fortement consommateurs.

### Emissions de gaz à effet de serre

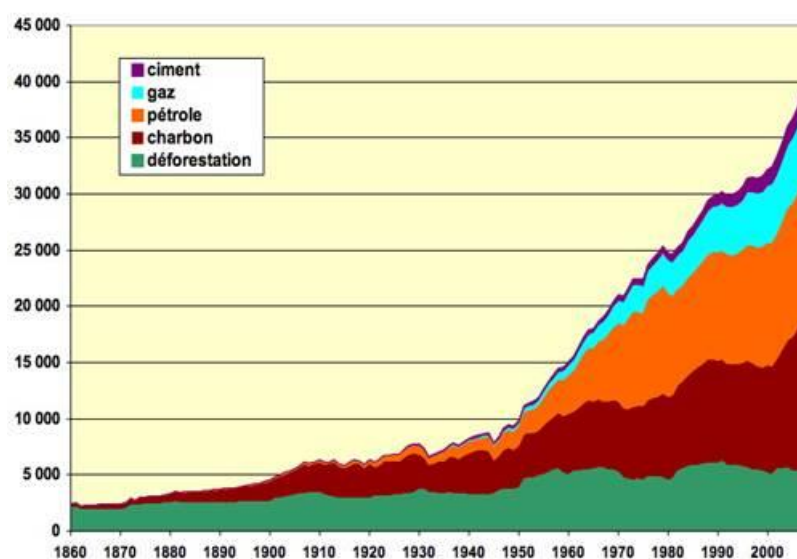


Figure 1, source J-M. Jancovici <sup>(1)</sup>: reconstitution des émissions anthropiques de gaz carbonique (Mt de CO<sub>2</sub>) depuis 1860.

La figure 1 montre quelles ont été en 2008 les émissions de CO<sub>2</sub> dues aux activités humaines (anthropiques). Sur un total de 39,2 Gt, 32 Gt, soit 81,6 %, étaient dues aux combustibles fossiles. Le reste était dû à la déforestation et à la décomposition thermique des carbonates utilisés pour la fabrication du ciment. Ces 32 Gt se décomposaient en 6,4 Gt pour le gaz, 12 Gt pour le pétrole et 13,6 Gt pour le charbon, soit respectivement 16,3%, 30,6 % et 34,7 % du total des émissions anthropiques. Si l'on rapproche ces valeurs de celles du tableau 1, on trouve que la contribution du gaz naturel aux émissions de CO<sub>2</sub> est en moyenne d'environ 2,6 tonnes par tep, celle du pétrole de 3 tonnes par tep, et celle du charbon de 4,3 tonnes par tep.

Les combustibles fossiles sont également responsables d'émissions de méthane (CH<sub>4</sub>), dont on sait que la contribution à l'effet de serre est, par unité de masse, 60 fois plus importante que celle du gaz carbonique au moment de son émission, et encore 21 fois 100 ans après.

Ces émissions de méthane, dont les quantités sont fort mal cernées, ont lieu au moment de l'extraction pour le charbon, dont les veines contiennent fréquemment du méthane (le grisou), et surtout pendant le transport et l'utilisation pour le gaz naturel. Pour le pétrole, les quantités émises sont plus faibles. Le méthane qu'il contient parfois est brûlé à la torchère et donc transformé en CO<sub>2</sub> et eau, mais de plus en plus récupéré.

Les émissions de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub> dues à l'utilisation des combustibles fossiles sont les principales responsables de l'augmentation de température de la surface terrestre observée depuis la fin du 19ème siècle qui marque le début de la croissance rapide de leur consommation à l'échelle mondiale.

### *Combustibles fossiles et économie*

L'importance des combustibles fossiles dans l'économie mondiale est capitale, puisqu'ils fournissent l'essentiel de l'énergie servant à produire les biens matériels, en particulier dans les pays développés. Si l'on essaie de traduire cette importance en termes monétaires, un obstacle est la fluctuation de leurs prix sur le marché, ou plutôt sur les différents marchés sur lesquels ils sont vendus et achetés. Les prix des pétroles sont assez voisins des uns des autres sur leurs marchés, dont les principaux sont le London Stock Exchange (LSE) qui cote le Brent et le New York Mercantile Exchange (Nymex), qui cote le West Texas Intermediate (WTI). Il n'en est pas de même pour le gaz, dont les prix peuvent être très différents sur ses différents marchés, Europe, Amérique du Nord et Asie-Pacifique étant les principaux. Cela est dû au coût considérable de son transport qui isole physiquement les marchés du gaz les uns des autres. Ils sont également différents selon qu'il s'agit de prix sur le marché spot ou de prix fixés par des contrats à long terme. On observe qu'au cours du temps, les évolutions des prix du gaz sur ses marchés ont jusqu'à présent suivi d'assez près celles des prix du pétrole. Cela est dû pour une grande part à l'indexation des prix du gaz sur ceux du pétrole dans les contrats à long terme entre fournisseurs et consommateurs. Le développement du gaz non conventionnel (gaz de schistes...) et des modifications des modes de calculs de prix dans les contrats à venir changeront peut-être cela. Les prix du charbon ne sont que peu influencés par ceux du pétrole.

Actuellement, le cours moyen du pétrole Brent en Europe est d'environ 100 euros par baril, soit à peu près 600 euros par tonne, et celui du gaz de 450 euros par tonne. Le prix moyen du charbon-vapeur, qui sert à produire de l'électricité est d'à peu près de 80 euros par tonne. Si l'on se



réfère aux contenus énergétiques, soit 1 tep par tonne pour le pétrole, 1,3 tep par tonne pour le gaz naturel et 0,6 tep par tonne pour le charbon-vapeur, cela représente par MWh d'énergie de l'ordre de 50 euros pour le pétrole, 30 pour le gaz et 12 pour le charbon-vapeur. Ces cours sont susceptibles de varier fortement dans l'avenir.

A partir du tableau 1, on peut estimer la valeur marchande de la production annuelle de combustibles fossiles à environ 4 000 milliards d'euros, soit deux fois le PIB annuel de la France. Cependant, cette évaluation est théorique, une grande part de la production de combustibles fossiles (environ 40 % pour le pétrole, 70 % pour le gaz, et 80 % pour le charbon) étant consommée sur place par les pays producteurs, dont beaucoup en fixent le prix de vente au consommateur en fonction de critères politiques. Mais elle prend tout son sens pour les pays gros consommateurs qui, comme la majorité des pays Européens, mais aussi le Japon et la Corée du Sud, n'ont pas de production significative sur leur sol et doivent s'approvisionner sur les marchés internationaux. La facture annuelle pour la France, qui n'extrait pratiquement plus de pétrole et de gaz de son sol et plus du tout de charbon était en 2010 d'environ 70 milliards d'euros, soit 3,5 % de son PIB et environ 10 milliards d'euros de plus que le budget de l'Education nationale ! Il est probable que cette facture va encore augmenter dans les années qui viennent, dans la perspective de difficultés de plus en plus grandes de la production mondiale de pétrole à suivre la demande, sauf installation d'une récession durable qui briderait cette demande et ferait baisser le prix du pétrole.

Les cours des produits raffinés, ceux qu'utilise le consommateur, sont fixés sur d'autres marchés, tels que celui de Rotterdam pour les produits pétroliers. Leur cours est bien sûr plus élevé que celui des produits bruts dont ils sont issus, sauf pour les produits fatals du raffinage, comme le fuel lourd utilisé pour la propulsion navale et la production d'électricité, dont les cours sont un peu inférieurs à celui du pétrole brut.

Les coûts du combustible dans le coût de l'énergie mécanique ou de l'électricité produite à partir de ces produits raffinés sont bien sûr d'autant plus élevés que le rendement des convertisseurs est faible. S'ajoute à tout cela les taxes. En ce qui concerne par exemple l'usage du pétrole sous forme de carburants dans les automobiles, le coût TTC est en France de l'ordre de 750 euros le MWh d'énergie mécanique fournie aux roues. Dans le coût de l'électricité, les coûts hors taxes du combustible en Europe sont en ce moment, sans doute très provisoirement, par MWh d'électricité produite, de l'ordre de 120 euros pour le fioul lourd, 60 pour le gaz et 30 pour le charbon-vapeur.

Les filières d'approvisionnement en combustibles fossiles sont organisées en « chaînes » avec en amont l'exploration (la recherche des gisements) et la production (l'exploitation des gisements) et en aval le transport, le raffinage ou le conditionnement et la distribution. Les investissements correspondants sont considérables, mais largement couverts jusqu'à présent par les prix du marché. Cependant, en ce qui concerne le pétrole et le gaz, les coûts d'investissement dans l'exploration et la production sont en hausse et se rapprochent rapidement des prix de marché pour les nouveaux projets. Le raffinage du pétrole est également en difficulté chronique, faute de marges suffisantes pour rentabiliser les investissements.

Les investissements nécessaires pour transformer l'énergie contenue dans les combustibles fossiles en énergie utile renchérissent notablement le coût du MWh produit, de manière très variable selon l'usage. Pour une automobile, selon son type et sa durée d'amortissement, la part de l'amortissement de l'investissement dans le coût du MWh d'énergie mécanique peut représenter de 2 à 5 fois celle du carburant. Pour la production d'électricité, le coût des amortissements de la

construction des centrales, dont la durée de vie est de l'ordre de 50 ans, représente actuellement environ 10 à 20 % du coût du combustible pour le fioul lourd, 20 à 30 % pour le gaz naturel et 50 à 60 % pour le charbon. Il en résulte en France un coût de production par MWh de l'ordre de 150 à 170 euros pour le fioul lourd, 70 à 80 euros pour le gaz et 50 à 60 euros pour le charbon-vapeur, en y incluant les frais de fonctionnement.

Selon l'Agence Internationale de l'Energie environ 1 000 milliards d'euros d'investissements (la moitié du PIB annuel de la France) seraient nécessaires chaque année pendant les 25 ans à venir, pour assurer la continuité des approvisionnements en énergie de l'économie mondiale aux standards actuels, pour l'essentiel dans les filières des combustibles fossiles, et en particulier dans l'exploration du pétrole et du gaz.

### *Perspectives à long terme*

La contribution des combustibles fossiles à l'approvisionnement énergétique mondial ne peut que diminuer lentement, les progrès réalisés par les autres sources d'énergie, nucléaire et renouvelables, étant encore très insuffisants pour les relayer de façon significative.

La disponibilité des combustibles fossiles pour alimenter la croissance de l'économie mondiale, mais aussi la maîtrise des émissions de gaz à effet de serre et des pollutions atmosphériques dues à leur usage sont donc des sujets majeurs de préoccupation pour l'avenir.

La vision la plus répandue de la disponibilité future des combustibles fossiles repose sur l'idée que l'accès à leurs réserves va certes coûter de plus en plus cher, mais que les ressources, en particulier celles de charbon, sont si abondantes que grâce à un continuum de progrès technologique ces réserves seront sans cesse croissantes au moins au cours de ce siècle. Cette disponibilité sera donc réglée essentiellement par le prix que le consommateur sera prêt à payer. Nous connaissons donc à l'échelle de ce siècle comme par le passé une croissance continue de la production de ces combustibles, sauf crises géopolitiques ou crises économiques amenant une diminution provisoire.

Cette vision s'oppose à celle des géologues, qui rétorquent que les activités humaines n'ont pas lieu «hors sol» : le stock des quantités récupérables est nécessairement fini et de plus en plus lent à découvrir et à exploiter, même s'il n'est pas connu à l'avance avec grande précision et si les progrès technologiques permettront d'en augmenter le taux de récupération: quels que soient ces progrès et le prix accepté par le consommateur, les quantités annuellement produites doivent donc un jour passer par un maximum (pic ou plateau) avant de décroître inexorablement, comme on le vérifie d'ailleurs par l'examen des données historiques des productions pour de très nombreux pays.

L'exemple du pétrole semble donner raison aux géologues : depuis 2005, la production mondiale stagne aux alentours de 85 millions de barils par an (un peu plus de 4 Gtep), malgré une demande croissante, venant en particulier des grands pays émergents, Chine, Inde, Brésil..., qui accèdent en ce moment à la civilisation de l'automobile. L'arbitrage se fait par une augmentation des prix, et/ou la stagnation des économies les plus consommatrices, celle des pays occidentaux. Depuis 2006 s'observe un déclin de plus en plus marqué de la production des gisements conventionnels de pétrole. Il est compensé jusqu'à présent par une production croissante de pétrole non conventionnel, liquides de gaz naturel (LGN) et pétroles extra lourds (XH), mais aussi de carburants synthétiques (XTL) fabriqués à partir du gaz naturel, (GTL), du charbon (CTL), et surtout pour l'instant biocarburants issus de la biomasse (BTL). Si la production des liquides de gaz naturel (LGN) augmente

rapidement avec la production de gaz dont ils sont issus, mais déclinera tout aussi rapidement qu'elle, il n'en est pas de même de celle des pétroles extra lourds et des carburants synthétiques, dont la production demande des investissements très importants. Il est donc probable que la production de pétroles, toutes origines confondues, naturels et synthétiques, commencera à décliner dans peu d'années.

Les géologues préviennent également que le déclin du gaz puis celui du charbon suivront, à échéance relativement brève, celui du pétrole au cours de ce siècle (figure 2).

Il n'est pas tenu compte ici des possibilités offertes par la production d'huiles de schistes par pyrolyse des schistes bitumineux ni de celles de la gazéification souterraine. Mais ces productions qui n'ont pas dépassé le stade du pilote posent de très gros problèmes environnementaux et, comme pour les pétroles extra lourds, demandent des investissements très coûteux. Elles seront nécessairement très lentes à se développer, même en admettant que l'on fasse fi de leurs inconvénients environnementaux.

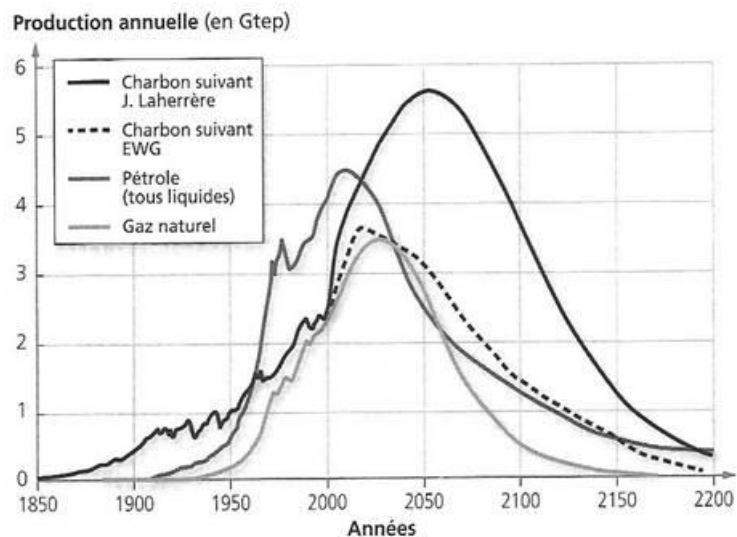


Figure 2, d'après A.Nicolas<sup>(3)</sup>: évolution à venir des productions de combustibles fossiles. Le charbon est le plus incertain : deux prévisions sont indiquées : celle de l'European Watch Group (EWG) et celle de Jean Laherrère (Association for the Study of Peak Oil, ASPO). La rubrique pétroles tous liquides recouvre le pétrole conventionnel, qui a atteint 3,6 Gtep en 2006 et décline depuis, les liquides de gaz naturels (LGN), les pétroles extra lourds, et les carburants synthétiques, composés surtout de biocarburants.

Le rythme des émissions de gaz à effet de serre épousera bien évidemment celui des productions. Il est possible, à partir des quantités de gaz carbonique émises par chaque catégorie de combustibles fossiles et en admettant que, comme maintenant, la moitié seulement des quantités émises gagnera l'atmosphère de modéliser l'évolution de ces émissions dans le temps (figure 3) ainsi que l'évolution de la température de la surface terrestre qui en résulterait. Les résultats de ces modélisations sont un peu plus rassurants que ce que prévoient les modèles fondés sur une croissance continue de la production, comme ceux de l'Agence internationale de l'énergie ou du GIEC, car ils se situent après 2050 en dessous de la plus basse de leurs prévisions. Mais ils prévoient quand même des augmentations préoccupantes de la température et comportent de grandes incertitudes, en particulier en ce qui concerne la production future de charbon. Il vaut donc mieux ne pas baisser la garde et faire de notre mieux pour limiter les émissions de CO<sub>2</sub> dues aux combustibles

fossiles. Cela d'autant plus que ces efforts s'accompagneront aussi d'une diminution des pollutions atmosphériques autre que le CO<sub>2</sub> et donc d'une amélioration de la santé publique (voir partie III ). Il faut aussi réaliser que ces limitations géologiques de la disponibilité des combustibles fossiles, étant donné leur importance capitale pour la production d'énergie et donc de biens matériels, entraîneront des contraintes énormes sur l'économie mondiale, en premier lieu sur les pays, tels que la France et la plupart des pays européens, dont l'approvisionnement dépend presque exclusivement du marché international.

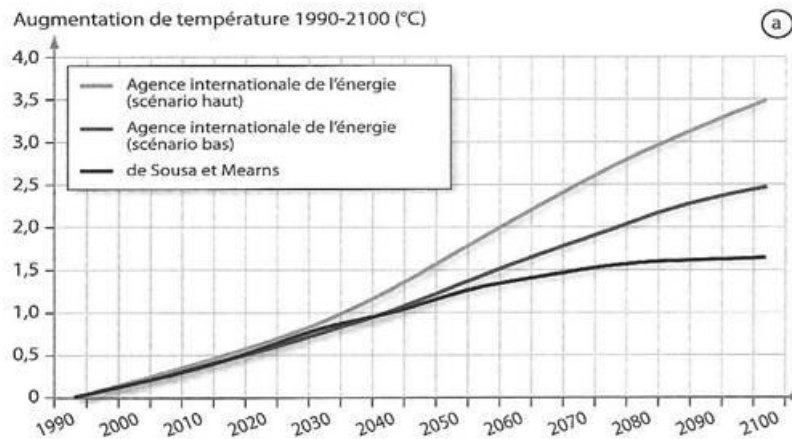


Figure 3, d'après A.Nicolas <sup>(3)</sup>: exemple de modélisation (de Souza et Mearns) montrant l'évolution de la température de la surface terrestre sur la base de production des combustibles fossiles contraintes géologiquement (cf figure 2 ), le total de ces productions étant de 1700 Gt de contenu en carbone , et comparaison avec les scénarios haut (7000 Gt de carbone) et bas (4000 Gt de carbone) de l'Agence internationale de l'énergie, pour lesquels les productions ne sont contraintes qu'économiquement.

Il peut en résulter un bouleversement rapide de la hiérarchie économique des nations avec dans ces pays, sauf à diminuer leur dépendance aux combustibles fossiles en développant très rapidement les énergies «décarbonées» (nucléaire, renouvelables) et en faisant de très gros efforts d'amélioration de leur efficacité énergétique, une «famine énergétique» et un appauvrissement rapide, alors que les pays bien pourvus de réserves, Moyen Orient pour le pétrole, Moyen-Orient et Russie pour le gaz, et pour le charbon Etats-Unis, Russie, Chine, Australie, et en Europe Allemagne et Pologne, pourront résister plus longtemps. Le premier acte de ce bouleversement est la crise pétrolière qui s'installe sous nos yeux, sans que nous y prenions vraiment garde <sup>(4)</sup>.

### Notes et références

- 1-Jancovici, J-M. (2010) : Comment évoluent actuellement les émissions de gaz à effet de serre ? <http://www.manicore.com/documentation/serre/GES.html>
- 2-Durand, B. (2011) : Les dangers du charbon (autres que l'effet de serre). Etude SLC (<http://www.sauvonsleclimat.org/>)
- 3- Nicolas, A. (2011) : Energies : une pénurie au secours du climat ? Belin : pour la science

### III- Dangers (autres que l'effet de serre)

Si l'opinion est régulièrement informée des dangers que présentent pour le climat les émissions de gaz à effet de serre dues aux combustibles fossiles, elle ne l'est pratiquement jamais de ceux que leur usage présente pour la santé publique et pour l'environnement, à l'exception des marées noires. Avec une mortalité annuelle dont l'ordre de grandeur est de un à deux millions de morts par an, c'est pourtant une des grandes causes de mortalité dans le monde et le charbon en est le principal responsable. Les grands pays émergents (Chine, Inde...) dont le développement actuel repose sur l'utilisation massive du charbon, en sont les grandes victimes, mais les pays européens n'en sont pas à l'abri. Le principal danger pour ces derniers est la pollution atmosphérique due aux centrales électriques à charbon et aux véhicules diesels.

#### *Les atteintes à l'environnement*

La marée noire d'Avril 2010 dans le golfe du Mexique est la seconde en importance, après celle provoquée en Janvier 1991 par l'Iraq lors de la Guerre du Golfe, de la litanie des marées noires qui se succèdent dans le monde depuis que le pétrole est devenu notre principale source d'énergie. Mais elles ne représentent en année moyenne que 20 % environ des rejets de pétrole dans l'environnement. L'essentiel de ces rejets est en fait dû à des fuites naturelles de pétrole provenant de gisements souterrains, et surtout à des rejets continuels en mer ou à terre par une multitude de pollueurs de toutes tailles, de l'individu à la grande entreprise, volontairement ou par accident. Fort heureusement, la persistance de la pollution n'est dans la plupart des cas que de peu d'années, car le pétrole est assez rapidement dégradé par des facteurs naturels: dispersion, évaporation, consommation par des bactéries, oxydation... Mais cette dégradation peut être considérablement retardée, s'il s'infiltré par exemple en masse dans le sous-sol, ou sous des vases argileuses en bordure de mer. Outre ses conséquences sur les activités littorales (pêche, tourisme...), ces pollutions ont de graves effets sur les écosystèmes, par asphyxie et engluement. Cependant la toxicité du pétrole à l'état brut est très faible: les marées noires ne sont pas de ce point de vue dangereuses pour les hommes.

L'exploitation des sables bitumineux de l'Athabasca au Canada entraîne à grande échelle la destruction de la forêt et la pollution des nappes phréatiques, des rivières et des lacs, non seulement par le pétrole, mais aussi par les déchets d'exploitation et les produits chimiques utilisés pour les traitements. Des destructions et des pollutions très importantes dues à l'exploitation du pétrole ou du gaz ont lieu de même en Amazonie (Equateur, Pérou ...), en Fédération de Russie, et en bien d'autres endroits où la réglementation environnementale ou bien son respect sont insuffisants.

Mais, ceci est beaucoup moins bien connu, l'exploitation du charbon est responsable d'atteintes à l'environnement encore plus étendues et plus durables, en particulier lorsqu'elle se fait à ciel ouvert (en découverte). Les exploitations de lignite en Europe (Allemagne, Pologne, Balkans), de charbon aux Etats-Unis (Appalaches, Wyoming) ou en Australie (Queensland), ont arasé des milliers de km<sup>2</sup> par des méthodes musclées et provoqué, rien qu'en Allemagne, le déplacement forcé d'environ 100 000 personnes et la destruction de leur habitat. Cela ne représente que les aspects les

plus spectaculaires d'une dégradation croissante de l'environnement par les exploitations et les produits de traitement qui entraînent aussi la dissémination dans les sols, les nappes phréatiques ou les cours d'eau des éléments hasardeux contenus dans les charbons. Les déchets du charbon se comptent en centaines de millions de tonnes chaque année, sous forme des stériles des exploitations et des cendres des centrales électriques à charbon (environ 50 000 tonnes de cendres produites par TWh d'électricité) mais aussi entre autres des déchets de la fabrication de l'acier. Ils sont stockés dans des conditions bien souvent précaires. Les incendies de mines ou de quartiers de mines abandonnés sont fréquents dans certains pays et pratiquement impossibles à maîtriser.

La pollution atmosphérique provoquée par l'utilisation des combustibles fossiles, en particulier du charbon, outre ses effets très importants sur la santé publique, a également des effets sur les écosystèmes. Un exemple bien connu est l'acidification des eaux des lacs d'Europe du Nord par les oxydes de soufre contenus dans les fumées des centrales à charbon et à fuel lourd, ayant entraîné une destruction de la faune et de la flore.

### *Les atteintes à la santé publique*

#### Mortalité immédiate

Le Paul Scherrer Institute (PSI) de Villingen en Suisse <sup>(1)</sup> a constitué pour les principales filières énergétiques une base de données de la mortalité immédiate due aux accidents ayant fait au moins 5 morts entre 1969 et 2000. Cette mortalité est en moyenne annuelle d'un peu plus de 2 600 morts. En ce qui concerne les combustibles fossiles, le charbon est le principal responsable : les morts sont dues à des coups de grisou ou de poussière, à des éboulements, des incendies ou des inondations par les eaux souterraines. Le plus grand nombre a lieu dans les pays n'appartenant pas à l'OCDE, en particulier en Chine.

	OCDE total	OCDE UE-15	Non-OCDE			
Filière énergétique	Accidents	Mortalité	Accidents	Mortalité	Accidents	Mortalité
Charbon	75	2 259	11	234	A 102	4 831
					B 1 044	18 017
Pétrole	165	3 789	58	1 141	232	16 494
Gaz naturel	80	978	24	229	45	1 000
GPL	59	1 905	19	515	46	2 016
Hydraulique	1	14	0	0	10	29 924
Nucléaire	0	0	0	0	1	31
Total	380	8 945	112	2 119	1 480	72 313

Tableau 2 : nombre d'accidents graves (plus de 5 morts) entre 1969 et 2000 et mortalité immédiate correspondante pour les principales filières énergétiques, pour les pays de l'Organisation pour la coopération et le développement économique (OCDE) et les pays n'appartenant pas à l'OCDE.

A : charbon non-OCDE hors Chine. B :Chine. D'après le PSI, Hirschberg et al.(2004)<sup>(1)</sup>

Viennent ensuite le pétrole, le gaz de pétrole liquéfié (GPL) puis le gaz naturel. Il s'agit dans ce cas d'explosions ou d'incendies sur des plates-formes d'exploitation, dans des usines de traitement ou des raffineries et d'accidents de transport : naufrage ou collision de navires, explosion d'oléoducs, de gazoducs, de conduites de distribution ou de camions-citernes.

Si l'on rapporte cette mortalité à la quantité d'énergie produite par les différentes filières, le GPL vient très largement en tête, suivi du charbon chinois puis, assez loin derrière, le charbon hors OCDE et hors Chine, le pétrole, le charbon OCDE puis le gaz naturel. Certains accidents, parce qu'ils ne sont pas directement liés à la consommation d'énergie, ne figurent pas dans cette base, comme celui de Los Alfaques en Espagne où l'explosion d'un camion-citerne de propylène près d'un camping a fait 217 morts en 1978 ou celui dû à la rupture d'une digue d'un bassin de stockage de déchets d'exploitation du charbon en Virginie Occidentale (USA), qui a fait 125 morts en 1972.

La mortalité est bien moindre dans les pays de l'OCDE que dans les pays non-OCDE, qui n'ont pas encore une culture de la sécurité suffisamment développée. Cependant, il y a eu aux Etats-Unis un accident ayant fait 38 morts en 1970 au Kentucky, un autre ayant fait 29 morts en 2010 en Virginie, et en Nouvelle-Zélande un accident a fait 27 morts en 2010.

Ces statistiques ne tiennent pas compte de la mortalité immédiate due aux accidents de moindre importance qui, par leur très grand nombre, sont au total bien plus meurtriers. Ces accidents sont particulièrement nombreux dans les mines de charbon « artisanales » de Chine et d'Inde. A nouveau, la mortalité due à ces « petits » accidents est bien moindre dans les pays de l'OCDE que dans les autres. Cependant, on estime qu'il y a encore chaque année depuis 2000 de l'ordre de 30 à 50 morts par an dans les mines de charbon des Etats-Unis <sup>(3)</sup>.

On estime qu'au total la mortalité par accident est, rien que pour le charbon, de 10 000 à 20 000 chaque année dans le monde <sup>(2)</sup> dont au moins la moitié en Chine.

Il y a chaque année de nombreuses morts non répertoriées dans des explosions ou des incendies provoqués par des prélèvements sauvages de pétrole sur des oléoducs ou dans des camions citernes accidentés, dans les pays Africains en particulier. Les explosions dues au gaz naturel (suite à des accidents domestiques, des fuites ou des endommagements de conduites...) provoquent également une mortalité importante. Elle est mal répertoriée, mais probablement, rien qu'en Europe des 27, de l'ordre de la centaine de morts chaque année.

### Mortalité différée

La mortalité différée due à l'usage des combustibles fossiles est multiforme et bien plus importante que la mortalité immédiate due aux accidents. On peut la classer en trois grandes catégories : celle due aux maladies professionnelles et, pour les populations, celle due à la toxicité d'éléments ou de molécules qu'ils contiennent et celle qui est due à la toxicité de leurs produits de combustion, de très loin la plus importante.

### Maladies professionnelles

Les plus graves d'entre elles sont des maladies respiratoires affectant les mineurs de charbon : silicose surtout, due à la présence de très fines poussières de silice présente dans l'atmosphère des mines, mais aussi obstructions bronchiques et pulmonaires dues à l'accumulation des poussières de

charbon dans les voies respiratoires. Il y a parfois des intoxications par l'oxyde de carbone lors d'incendies, ou des dégagements d'hydrogène sulfuré, sans oublier les émanations de radon 222 dans les mines mal aérées. La mortalité, autrefois très importante dans les pays de l'OCDE, s'y est considérablement réduite, mais elle est très importante hors OCDE, particulièrement en Chine. Il s'agit au total de centaines de milliers de morts par an <sup>(2)</sup>. Les maladies respiratoires se déclarent après des années de travail : on estime qu'en France, il y a encore quelques centaines de morts par an dues à la silicose <sup>(4)</sup>, alors qu'il n'y a plus de mines en activité.

#### Maladies liées à la toxicité d'un constituant

Le pétrole brut contient peu de produits toxiques : benzène et toluène dans sa fraction légère et traces d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) de nickel et de vanadium dans sa fraction lourde, tous produits réputés cancérigènes. Les teneurs sont insuffisantes pour présenter un danger important, même en cas de marée noire. Le danger des marées noires est l'asphyxie pour les animaux qui y sont piégés et très rarement les hommes. Les dangers sanitaires pour l'homme sont a priori plus importants en cas de pollution persistante du sous-sol, des nappes phréatiques et des cours d'eau, mais cela reste à démontrer clairement.

Le gaz naturel contient parfois de grandes quantités d'hydrogène sulfuré, toxique mortel à très faible teneur dans l'atmosphère, et des traces de composés organiques d'arsenic et de mercure. Ces produits sont bien entendu éliminés avant commercialisation et on n'a pas rapporté semble-t-il d'intoxication chez les exploitants.

Les charbons contiennent en teneurs très variables de petites quantités d'un grand nombre d'éléments dits hasardeux parce qu'ils représentent un danger avéré pour la santé. 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, du thallium et du vanadium. Il contient aussi des traces d'isotopes radioactifs: uranium, thorium et potassium 40, ainsi que leurs descendants, radium 226 et radon 222 en particulier. Ces éléments sont mobilisés par les exploitations ou lors du déstockage de leurs déchets à la suite de rupture de digues ou de fuites et peuvent se retrouver dans les nappes phréatiques et les cours d'eau. Sauf exception, mercure (toxique nerveux) en particulier, la rareté des études épidémiologiques ne permet pas de conclure clairement quant aux effets sur la santé des riverains. Il contient aussi parfois des molécules organiques toxiques, comme celles responsables de la Néphropathie Endémique des Balkans, observée autour des exploitations de lignite des Balkans <sup>(5)</sup>. Le béryllium serait à la source de maladies de l'audition chez les enfants en Tchécoslovaquie <sup>(5)</sup>.

Les produits de traitement utilisés pour l'exploitation des combustibles fossiles peuvent également présenter des risques sanitaires.

#### Maladies liées aux produits de combustion

Les produits toxiques de la combustion des combustibles fossiles ou dérivés de cette combustion sont extrêmement nombreux <sup>(2)</sup> : oxydes de soufre et d'azote, oxyde de carbone, hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), dioxines, ammoniac, goudrons, suies (particules carbonées), composés organiques volatils (COV). L'ozone dit troposphérique, toxique préoccupant et



très surveillé, est formé secondairement par réaction photochimique entre oxydes d'azote et COV. Tout cela contribue à la pollution atmosphérique et constitue un important danger pour les populations ainsi que pour les écosystèmes et les productions agricoles.

La combustion du charbon présente en outre des risques spécifiques dus à son contenu en éléments minéraux hasardeux, arsenic, fluor et mercure en particulier, qui sont volatilisés dans l'atmosphère ou véhiculés dans les cendres volantes. D'autre part les cendres restantes de cette combustion (cendres de foyer et la partie des cendres volantes arrêtée par les filtres) sont enrichies en ces éléments et sont souvent stockées en conditions précaires.

L'importance des risques varie en fonction du mode d'utilisation et du combustible : l'utilisation domestique du charbon en milieu confiné, pour le chauffage ou la cuisine, comme cela se pratique encore énormément dans les pays émergents ou en voie de développement, présente le maximum de risques, en particulier pour les femmes et les enfants. En Chine, on observe des maladies spécifiques dues à la contamination par l'arsenic, le fluor et parfois le thallium d'aliments séchés au dessus de poêles à charbon <sup>(5)</sup>.

Mais à l'échelle mondiale le risque le plus général et le plus préoccupant est la formation d'ozone troposphérique et, plus encore, celle de très fines particules carbonées. Les particules les plus fines (dites PM 10 pour celles dont la plus grande dimension est au plus égale à 10 microns et PM 2,5 pour celles dont la plus grande dimension est au plus égale à 2,5 microns) peuvent pénétrer très profondément dans les poumons et peut-être même pour les plus fines dans la circulation sanguine et y véhiculer une variété de polluants. Elles ont de graves effets sur la santé à des concentrations même faibles dans l'atmosphère.

On estime que la mortalité due aux produits de combustion des combustibles fossiles est, rien que pour le charbon, au moins du million de morts par an à l'échelle mondiale, à nouveau surtout dans les pays hors OCDE, Chine <sup>(2)</sup> particulièrement.

La mortalité dans les pays de l'OCDE reste toutefois importante : la dangerosité des particules fines carbonées y a été établie par des études épidémiologiques montrant, pour les concentrations usuelles de l'atmosphère des villes, soit de 20 à 200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  d'air <sup>(6)</sup>, une relation à peu près linéaire entre leur concentration et la mortalité différée. Les estimations sont de l'ordre de quelques centaines de milliers de morts par an en Europe des 27. La population des villes est la plus menacée mais les particules, à cause de leur finesse, peuvent voyager très loin. Si, comme on le fait pour la radioactivité, on extrapolait linéairement, hors de toute validation par des études épidémiologiques, ces estimations à des teneurs encore plus faibles, on obtiendrait des valeurs considérablement plus importantes.

Les combustibles fossiles ne sont bien sûr pas les seuls responsables de la formation de ces particules carbonées : il y a aussi entre autres la combustion du bois et, plus généralement, de la biomasse, aux effets dévastateurs dans les populations pauvres où il s'agit de la principale ressource énergétique. Mais en Europe, même si on y assiste à un développement insuffisamment contrôlé du chauffage au bois, ils en sont les principaux responsables, du fait des installations industrielles <sup>(7)</sup>, en particulier les centrales électriques à combustibles fossiles, charbon en tête et du fait des véhicules à moteur thermique, véhicules diesels surtout.

L'opinion est en France très mal informée de ces problèmes, les médias restant fort discrets sur le sujet. Des progrès considérables pourraient être faits pour la protection des populations, en

particulier par une filtration plus efficace des fumées des centrales électriques à combustibles fossiles et des véhicules diesels. Mais les particules extrêmement fines, les plus dangereuses, ne peuvent pas être arrêtées par les filtres actuels.

### *Notes et références*

- 1- Hirshberg, S. et al., 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)
- 2- Durand, B., 2011: Les dangers du charbon. Etude SLC, [www.sauvonsleclimat.org](http://www.sauvonsleclimat.org)
- 3-Fondation ALCEN pour la connaissance des énergies,  
<http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/charbon-quels-dangers>
- 4 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.
- 5-Finkelman, R.B. and Bunnell, J.E.: Health Impacts of Coal, Short Course A  
<http://pubs.usgs.gov/of/2004/1283/shortcoursea.pdf>
- 6- Declercq, C., 2010: Pollution atmosphérique, données épidémiologiques. Institut National de Veille Sanitaire ( InVS)
- 7- European Environment Agency, 2011: Revealing the costs of air pollution from industrial facilities in Europe, EEA technical report No 15/2011