

Les combustibles fossiles, grands oubliés du Débat national sur la transition énergétique (DNTE)

Conférence du 12 Décembre 2013 au Collège de France

B.DURAND *

**Ancien directeur de la Division Géologie-Géochimie de l'Institut français du pétrole et des énergies nouvelles (IFPEN), ancien directeur de l'Ecole nationale supérieure de géologie (ENSG), ancien président du Comité Scientifique de l'European Association of Petroleum Geoscientists and Engineers (EAGE), membre de l'ASPO (Association for the Study of Peak Oil and Gas) France et du Comité Scientifique de l'Association Sauvons le Climat (SLC).*

«Tant qu'il fait beau, l'homme ne prévoit pas l'orage» (Machiavel)

Résumé

Les combustibles carbonés fossiles (charbon, pétrole et gaz) sont depuis 150 ans les principaux moteurs de l'économie mondiale. Ils représentent encore plus de 80 % de l'approvisionnement énergétique de l'humanité malgré les efforts faits pour développer de nouvelles sources d'énergie. Ils ont joué un rôle majeur dans les progrès matériels et humains des pays dits «développés», ainsi que dans la croissance de la population mondiale.

Il est alors très étonnant que la question essentielle de leur disponibilité dans l'avenir n'ait même pas été effleurée dans le Débat national sur la transition énergétique (DNTE) qui vient d'avoir lieu en France.

Cette disponibilité ne va pourtant pas de soi et pose problème à terme bien plus bref qu'il n'est généralement imaginé. Dans beaucoup de pays, les productions sont déjà en déclin et pour certains, en particulier en Europe, les quantités récupérables sont proches de l'épuisement.

Une analyse prospective montre que la probabilité est forte pour que la production mondiale de pétrole commence à décliner pour des causes géologiques vers 2020, et celle de gaz vers 2030, et cela malgré le développement du pétrole et du gaz dits de schistes (en fait de roches-mères) qui occupe tant à l'heure actuelle les médias. La production de charbon devrait plafonner à partir de 2025-2030, mais décliner seulement en 2070. Au total la quantité d'énergie mise à disposition de l'humanité par les combustibles fossiles devrait décliner rapidement après 2025. Le déclin de la quantité moyenne disponible par habitant devrait connaître un déclin encore plus rapide, du fait de l'augmentation de population de la planète.

Très préoccupant pour les pays développés est le pétrole, principal moteur de leur activité économique, car son déclin semble très proche. Un élément aggravant pour les pays qui comme les pays de la Zone Euro et particulièrement la France sont dépourvus de ressources et dépendent donc entièrement du marché international, est que les quantités qui en seront mises sur ce marché déclineront avant la production mondiale et plus vite qu'elle, car les pays exportateurs en consomment des quantités croissantes pour assurer leur développement tout en faisant face à l'accroissement de leur population. La France et la Zone Euro devront aussi y affronter la concurrence des grands pays émergents comme la Chine et l'Inde, et seront très vulnérables à une rupture d'approvisionnement ou à une flambée des prix qui seraient dus à une crise politique. Ils ont donc un fort intérêt à faire décroître le plus vite possible leur consommation de pétrole.

Les combustibles fossiles donneront donc le tempo de la transition énergétique et l'effort à faire pour les remplacer par d'autres sources d'énergie est immense.

Par contre ce déclin annoncé devrait conduire à des émissions anthropiques de gaz carbonique plus faibles que généralement prévues.

Introduction: les combustibles fossiles, principaux moteurs de l'économie mondiale.

Depuis des années, des discussions récurrentes ont lieu sur les relations entre économie et disponibilité d'énergie. Presque systématiquement, on y occulte une loi pourtant parfaitement connue des physiciens, mais que semblent ignorer beaucoup d'économistes: aucune transformation de la matière ne peut avoir lieu sans utiliser d'énergie, ou plus précisément sans convertir des formes d'énergie les unes dans les autres.

Ainsi aucune production de biens ou de services matériels par une société humaine, c'est le but de l'économie, n'est possible sans disposer d'énergie.

Cette énergie est tout d'abord prélevée sur la nature à différentes sources, sous forme de ce qu'on appelle les énergies primaires.

Leur utilisation pour produire ces biens et ces services se fait aux prix de lourdes pertes sous forme de chaleur inutilisée. La diminution de ces pertes, c'est ce qu'on appelle l'amélioration de l'efficacité énergétique, est un objectif important pour l'avenir. D'importantes améliorations ont déjà eu lieu dans le passé et nul doute qu'il y en aura d'autres dans l'avenir, surtout si le prix de l'énergie augmente beaucoup. Mais leur rythme ne peut être que lent et elles ont des limites physiques.

A l'échelle de temps d'une génération, il ne peut donc y avoir de croissance très importante de la production de biens et de services matériels, c'est-à-dire de véritable croissance économique, sans accroissement de la consommation d'énergie primaire.

C'est bien ce qu'on observe sur la figure 1 qui montre, pour les 20 pays les plus consommateurs de pétrole de la planète (75% de la consommation au total) la variation de leur consommation d'énergie primaire au cours de la décennie 2002-2012: les pays dont l'économie a stagné ou régressé pendant cette période sont aussi ceux dont la consommation d'énergie primaire a diminué.

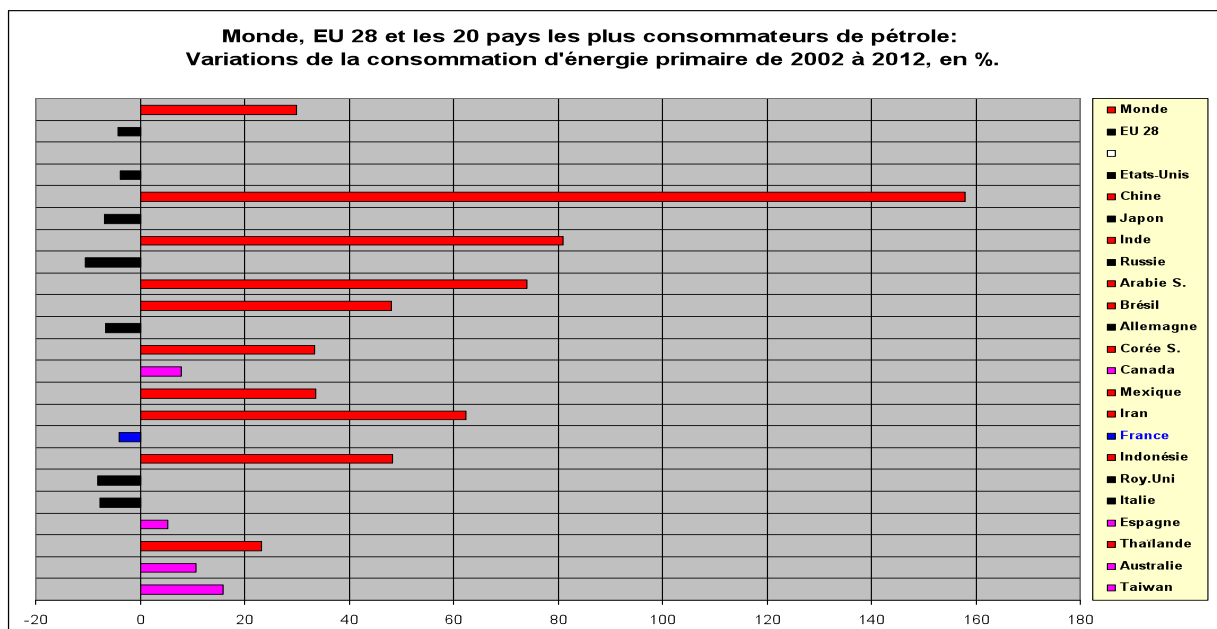


Figure 1: variation de la consommation d'énergie primaire des 20 pays les plus consommateurs de pétrole pendant la décennie 2002-2012. Les seuls pays ayant connu une forte croissance économique sont ceux dont la consommation a beaucoup augmenté (en rouge), la croissance la plus spectaculaire étant celle de la Chine. En rose les pays ayant connu une faible croissance. Source: British Petroleum Statistical Review 2013.

La disponibilité d'énergie primaire est donc à tout moment le principal déterminant de l'économie des nations.

Après le milieu du 19^{ème} siècle sa consommation mondiale a commencé à croître de façon fulgurante (figure 2), essentiellement dans ce qu'on appelle les pays développés, les premiers à avoir bénéficié de la Révolution Industrielle.

C'est cette très forte croissance qui a permis dans les pays développés les progrès matériels, mais aussi sociaux (diminution du temps de travail, éducation, culture, retraites...), ainsi que l'accroissement de l'espérance de vie grâce aux progrès de l'hygiène et de la médecine. Elle est aussi à l'origine de la très forte croissance de la population mondiale pendant cette période.

L'essentiel en a été dû aux combustibles fossiles, charbon, puis pétrole, puis gaz. La période de plus forte croissance, de la fin de la Seconde Guerre Mondiale au premier choc pétrolier en 1973, a été due surtout au pétrole. Le bois a joué, et joue encore, un rôle non négligeable. Des autres sources d'énergie primaire, énergie hydraulique et énergie nucléaire se sont développées tardivement, et à l'échelle mondiale elles ne jouent encore à l'heure actuelle qu'un rôle secondaire. Les énergies renouvelables autres que le bois et l'énergie hydraulique n'ont encore qu'un rôle confidentiel.

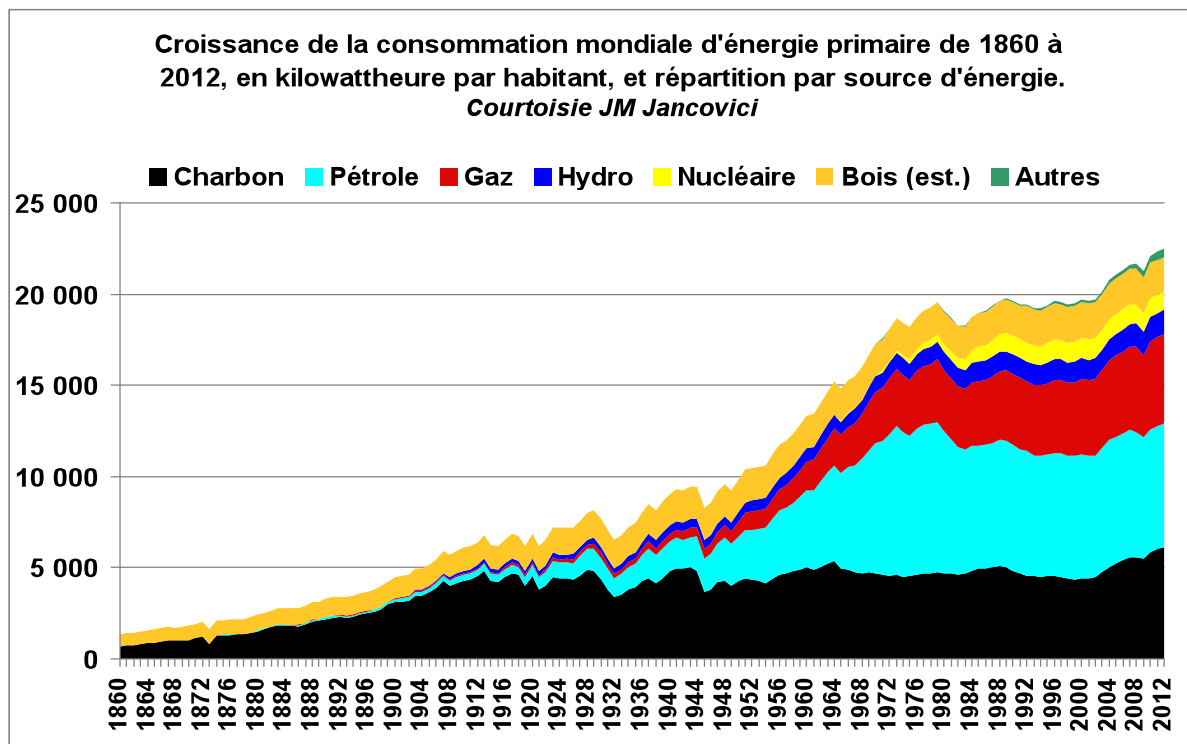


Figure 2: Croissance de la consommation moyenne d'énergie par habitant de la planète de 1860 à 2012, en kWh par habitant. Courtoisie JM Jancovici.

La figure 3 montre quelles sont, pour les pays recensés sur la figure 1, les proportions de combustibles fossiles dans leur consommation d'énergie primaire, hors bois. La contribution totale des combustibles fossiles est en moyenne de 86,6%. La France, grâce à son nucléaire, a la contribution la plus faible, 53 %, et il s'agit surtout de pétrole. L'Arabie Saoudite a la contribution la plus forte, 100 %.

Les combustibles fossiles sont donc depuis 150 ans les principaux moteurs de l'économie mondiale. Et la plus grande partie de la population mondiale actuelle, pour le meilleur ou pour le pire, leur doit de fait son existence.

Il est alors très étonnant qu'il n'en ait pratiquement pas été question dans le récent Débat national sur la transition énergétique qui s'est récemment tenu en France, privant ainsi les Français d'informations essentielles sur leur situation énergétique. En particulier, la question de la disponibilité future des combustibles fossiles n'a pas été abordée.

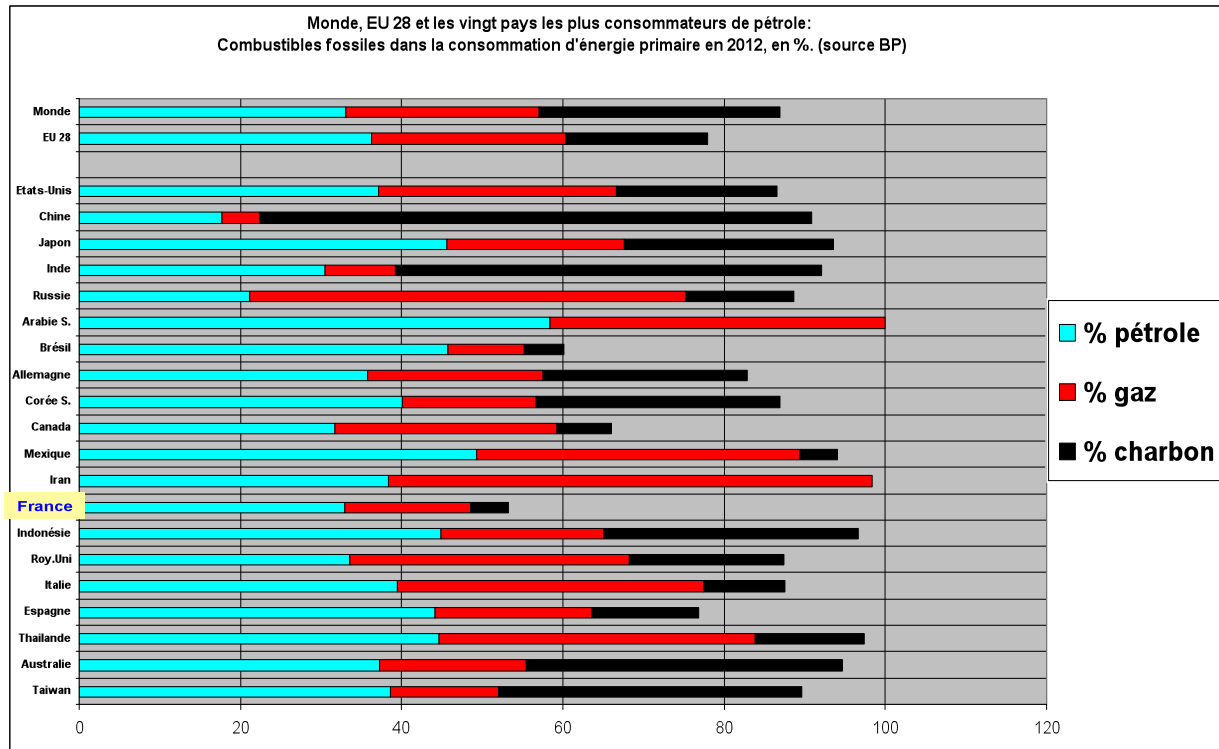


Figure 3: proportions des combustibles fossiles dans la consommation d'énergie primaire hors bois des 20 pays les plus consommateurs de pétrole. Ces données proviennent de la British Petroleum (BP) Statistical Review, qui ne prend pas en compte la biomasse traditionnelle (bois de chauffage...). Sa prise en compte ramènerait la proportion moyenne à environ 81%, valeur la plus souvent citée, mais ne changerait pas grand chose pour les pays très industrialisés, relativement peu consommateurs de bois.

Nous allons voir ici qu'en fait cette disponibilité pose problème à terme relativement bref, en particulier pour le pétrole, et qu'il y a lieu de s'en inquiéter sérieusement. Nous examinerons également brièvement quelles en sont les conséquences sur les émissions anthropiques de gaz carbonique.

Combien de temps les combustibles fossiles peuvent-ils encore durer ? Les limites des combustibles fossiles.

1 - Les leçons du passé

- L'exemple de la France (figure 4)

L'exemple de la France est révélateur de la façon dont se déroule dans un pays une production de ressources minérales, ici les combustibles fossiles, au cours du temps. **Il permet de dégager aisément deux notions essentielles pour éclairer l'avenir, celle d'Ultime, et celle de pic de production.**

La production de charbon française a commencé à croître de manière importante et régulière vers le milieu du 19ème siècle (figure 4). Après les vicissitudes dues aux guerres, à la crise économique européenne de 1933, conséquence de la Grande Crise de 1929 aux Etats-Unis, elle est passée par un maximum en 1959. Sa décroissance a été d'emblée rapide. Cela est dû au fait qu'à cette époque la production était devenue lourdement subventionnée par rapport aux prix pratiqués sur le marché mondial: cette décroissance a donc été organisée pour diminuer les charges sur le budget de l'Etat. A partir de 1974, après le premier choc pétrolier, le rythme de décroissance a été moins rapide, le charbon étant alors plus demandé. Mais finalement la production a fini par s'éteindre en Avril 2004 avec la fermeture des dernières mines en activité.

Cette histoire illustre le fait que dans un pays donné, la production possible d'une ressource minérale n'est pas infinie: elle part de zéro et ne peut que revenir à zéro une fois les réserves totalement consommées. Entre les deux, la production passe obligatoirement par un maximum absolu, que l'on appelle pic de production.

Nous parlons bien de réserves, c'est-à-dire de quantités exploitables de façon rentable dans les conditions économiques du moment et non de ressources, notion qui ne tient pas compte de l'exploitabilité réelle. La quantité ultime de ces réserves, en abrégé Ultime, correspond à la surface sous la courbe de production, une fois celle-ci définitivement arrêtée.

L'Ultime est très mal connu au départ, et dépend bien sûr des conditions économiques et même politiques (subventions par exemple) tout au long de l'histoire de la production, ainsi que des découvertes de nouveaux gisements exploitables et des progrès de productivité grâce à ceux de la technologie, mais il se précise au fur et à mesure de l'exploitation, et nous verrons qu'il existe des méthodes pour le prévoir de façon approchée quand l'exploitation est déjà bien avancée.

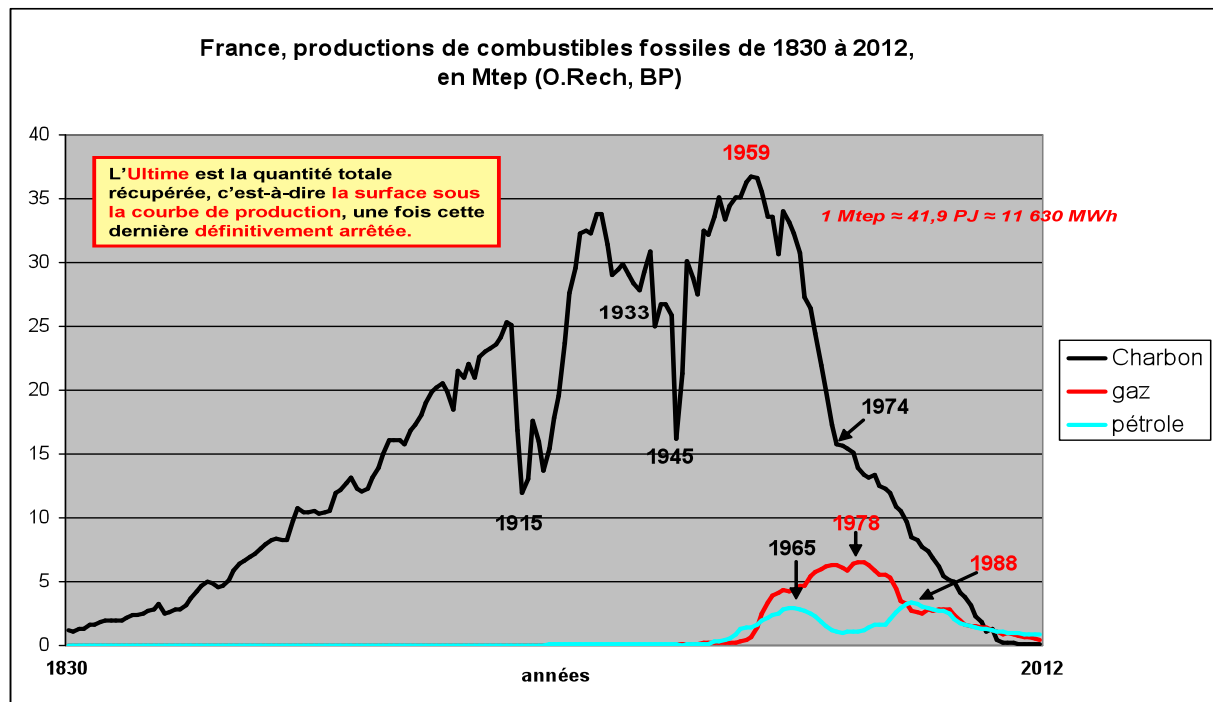


Figure 4: productions de charbon, de gaz naturel et de pétrole en France de 1830 à 2012,

ramenées à la même unité de contenu énergétique (million de tonne-équivalent-pétrole, Mtep).

L'histoire des productions de gaz et de pétrole en France est longue, puisqu'elle débute avec le gisement de pétrole lourd de Pechelbronn, dont les indices de surface étaient connus depuis le Moyen-âge, mais qui ne fut exploité rationnellement qu'à partir de 1740. Cependant il s'agissait de petites quantités, même si la France fut alors, en y ajoutant un «pétrole synthétique», l'huile obtenue par pyrolyse des Schistes d'Autun (la première exploitation date de 1837, à Igornay en Saône- et-Loire), le premier producteur de pétrole de l'époque, jusqu'au développement rapide de la production américaine après le célèbre forage de 1859 du Colonel Drake en Pennsylvanie.

Ces productions ont cru notablement, tout en restant modestes, après la deuxième guerre mondiale. Le gaz, extrait principalement du gisement de Lacq, a connu son pic en 1978 et son Ultime est presque atteint. Le pétrole a d'abord été extrait du Bassin d'Aquitaine. Celui-ci a ensuite été relayé par le Bassin de Paris, d'où une production avec deux bosses. Le pic date de 1988 et l'Ultime est presque atteint.

De nouvelles exploitations de gaz et de pétrole ne sont pas strictement impossibles en France, sous forme en particulier de gaz et de pétrole de roches-mères (improprement appelés gaz et pétrole de schistes par les médias, car les roches qui les contiennent ne sont pas des schistes, qui sont des roches métamorphiques, au sens géologique du terme. C'est en fait une mauvaise traduction du terme américain «shale»). Il s'agit de gaz et de pétrole piégés dans ou au contact des «roches-mères» (les roches sédimentaires qui leur ont donné naissance), dans des formations de très faible perméabilité, mais d'où on peut cependant en extraire une partie après une fracturation hydraulique permettant d'accroître cette perméabilité. Les réserves correspondantes se trouveraient principalement dans le Bassin de Paris pour le pétrole, et le Bassin du Sud-Est pour le gaz. Mais rien n'est sûr, et l'opposition des associations écologistes est forte. D'autre part le régime de propriété du sous-sol, en France c'est l'Etat qui le possède, ne favorise pas l'implication des propriétaires du sol.

La production de «pétrole synthétique» sous forme d'huile de schistes obtenue par pyrolyse de schistes bitumineux, comme cela été le cas avec les Schistes d'Autun, est également possible en théorie. L'objectif serait alors sans doute les affleurements des schistes bitumineux du Toarcien Inférieur en Lorraine et Bourgogne, dont l'exploitation a été momentanément envisagée après les chocs pétroliers de 1973 et 1979.

En ce qui concerne le charbon, il existe encore des possibilités: en particulier un assez gros gisement de houille (peut-être 250 Mt de réserves, soit environ l'équivalent de 170 Mtep) n'a pas encore été exploité près de Lucenay- lès-Aix dans le Sud de la Nièvre. Mais les conditions économiques et environnementales ne semblent guère favorables. Et on ne pourra pas rouvrir les mines fermées, qui sont maintenant ennoyées, même si l'on voulait en extraire à long terme les dernières miettes de charbon parce qu'il se vendrait alors à des prix devenus très rémunérateurs. Une exploitation par «gazéification souterraine», dans les bassins houillers maintenant abandonnés, des veines de charbon trop profondes pour être exploitées par mines souterraines, a été envisagée après les chocs pétroliers. La technique consiste à forer à l'intérieur de ces veines par un forage dirigé reliant deux puits verticaux, puis de provoquer une combustion en déficit d'oxygène et en présence de vapeur d'eau dans ce forage, et de récupérer en surface le gaz produit : celui-ci est un «gaz de synthèse» permettant de synthétiser une foule de produits, dont en particulier des carburants. Des essais ont eu lieu dans les grands pays industrialisés, en France à Bruay-en-Artois, mais la technique est incertaine et très coûteuse et ses effets sur l'environnement sont très mal connus.

- L'exemple du Royaume-Uni (figure 5)

Le Royaume-Uni a été le berceau de la Révolution Industrielle à la fin du 18^{ème} siècle. Celle-ci, avant de s'étendre à l'Europe puis au reste du monde, s'y est développée grâce au charbon de l'Angleterre et du Pays de Galles, disponible en abondance.

La production de charbon a connu une progression rapide et régulière jusqu'à son pic, atteint en 1913. Elle a ensuite décliné en enregistrant les vicissitudes de l'histoire de ce pays: première guerre mondiale, grève générale de 1926, crise économique européenne de 1933, deuxième guerre mondiale. Après celle-ci, les subventions élevées à sa production ont conduit comme en France le gouvernement à en programmer le déclin, ce qui a conduit pendant l'ère Thatcher à la grande grève des mineurs de 1984. La production a malgré tout continué à décliner. L'Ultime est maintenant presque atteint.

Le relais a été fort opportunément pris progressivement, à partir de 1970, par les productions de gaz naturel et de pétrole extraits des gisements découverts en Mer du Nord. Mais ces productions ont connu leur pic en 1999 et déclinent très rapidement depuis, malgré les prix très élevés du pétrole et les progrès technologiques dans l'extraction.

On observe pour le pétrole une chute brutale de production en 1988. Elle est due à un très grave accident, l'explosion de la plateforme Piper Alpha du gisement Piper au large de l'Ecosse, qui a désorganisé momentanément la production pétrolière en Mer du Nord (et fait 167 morts !).

Au Royaume-Uni toutes les productions de combustibles fossiles sont donc actuellement en fort déclin, et leurs Ultimes non loin d'être atteints.

L'exploitation des gaz de roches-mères est envisagée, en particulier dans le Bassin de Bowland dans le Centre de l'Angleterre, mais les réserves y sont loin d'être assurées.

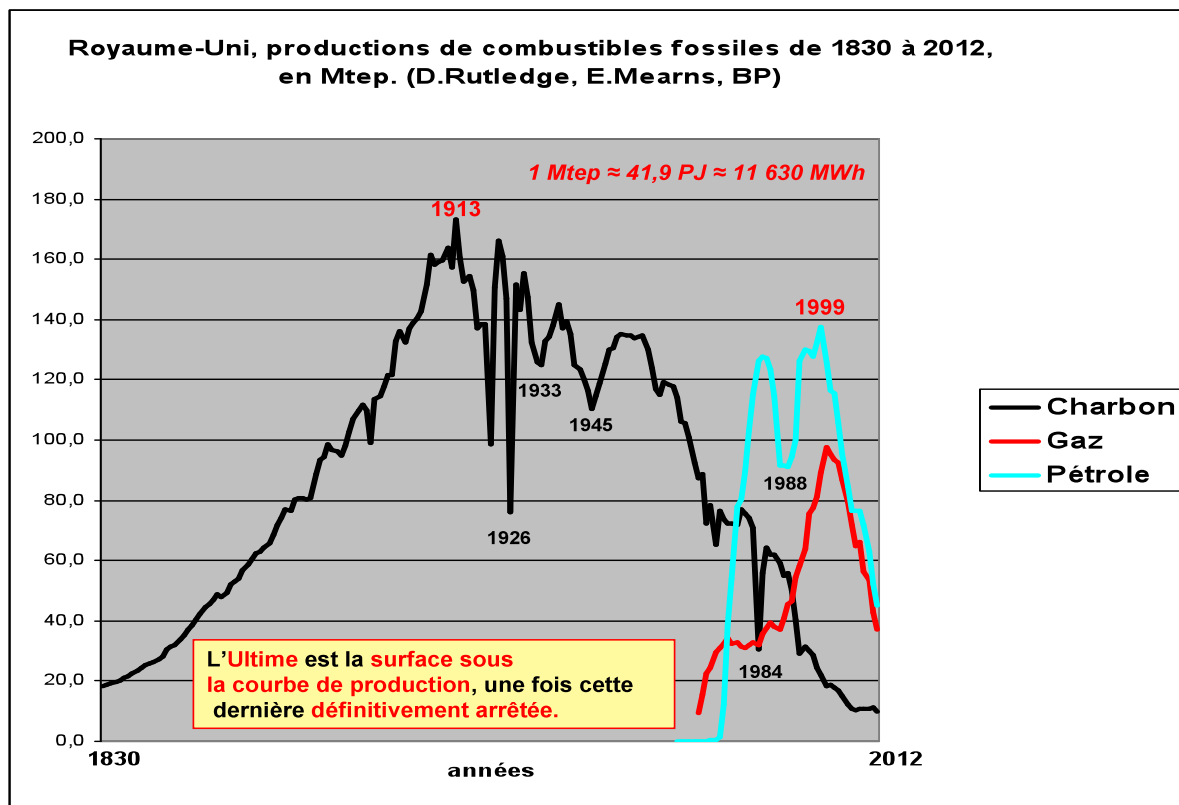


Figure 5 : productions de charbon, de gaz et de pétrole au Royaume-Uni de 1830 à 2012, ramenées à la même unité de contenu énergétique (million de tonne-équivalent-pétrole, Mtep).

- L'exemple de l'Allemagne (figure 6)

Comme la France et le Royaume-Uni, l'Allemagne possède des gisements de houille (hard coal), charbon de bon contenu énergétique, environ 0,7 tep par tonne en moyenne en Allemagne, exploitables par mines souterraines. Elle possède en plus à faible profondeur d'importants gisements de lignite (brown coal), charbon de faible contenu énergétique (environ 0,25 tep par tonne en moyenne en Allemagne), exploitables à ciel ouvert («découvertes»). Ce lignite est produit à bas coût et sert essentiellement à produire de l'électricité. La production de houille a cru considérablement et régulièrement de 1850 à 1914. Ensuite, elle a enregistré les vicissitudes de l'histoire allemande: première guerre mondiale, crise économique allemande de 1924, crise économique européenne de 1933, deuxième guerre mondiale. Son pic a été atteint en 1944. Puis, comme en France et au Royaume-Uni et pour les mêmes raisons, un déclin a été organisé. Son Ultime est presque atteint: Il est prévu de fermer les dernières mines en 2018.

La production de lignite a démarré en 1870 et a connu à peu près les mêmes aléas que le charbon. Elle a cependant cru jusqu'en 1989, date de la Réunification Allemande. Elle a ensuite chuté très rapidement, du fait de la remise à niveau de l'industrie Est Allemande, qui utilisait beaucoup de lignite avec une faible efficacité énergétique. Elle augmente à nouveau depuis 2001. L'Allemagne est actuellement le premier producteur mondial de lignite.

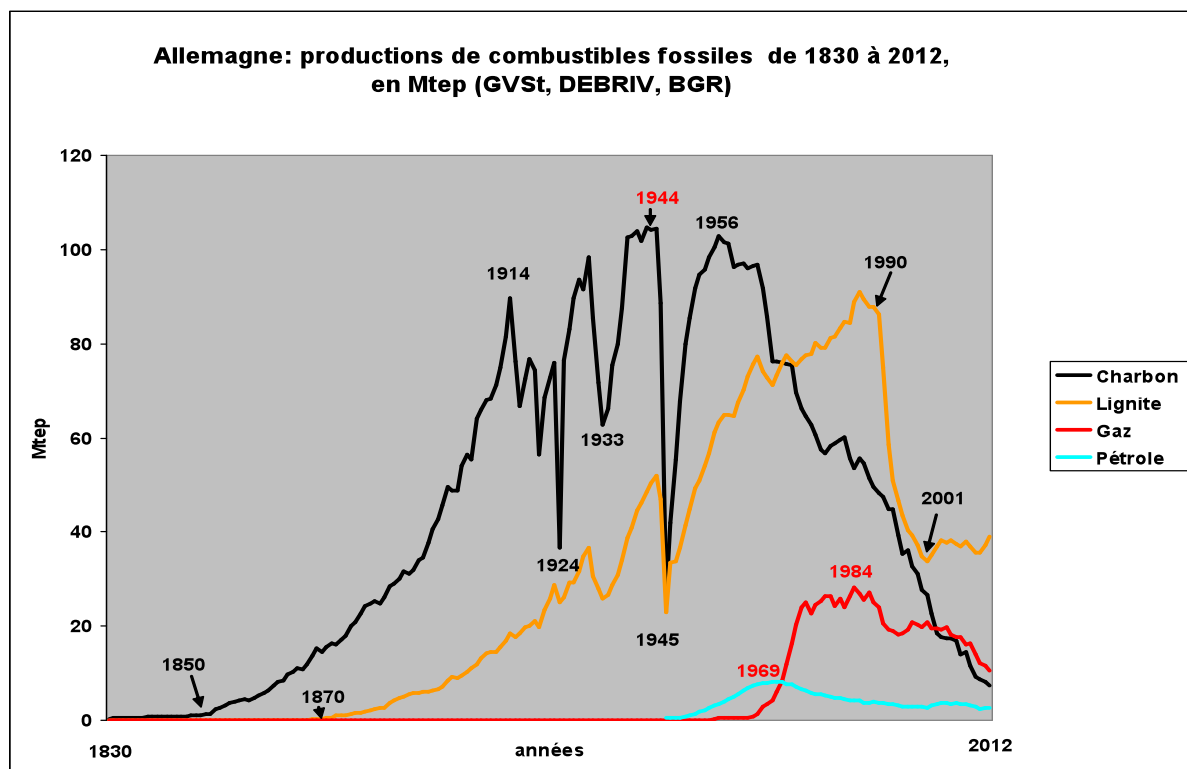


Figure 6: productions de charbon, de lignite, de gaz et de pétrole en Allemagne de 1830 à 2012, en Mtep.

Le gaz naturel et le pétrole ont d'abord été extraits de gisements principalement situés en Allemagne du Nord. Dans un second temps s'est ajoutée pour le pétrole une production d'un gisement relativement important situé sur le littoral de la Mer du Nord. Le pic du pétrole a eu lieu en 1969, et celui du gaz en 1984. Même si les productions ne sont pas négligeables encore actuellement, leurs Ultimes sont à présent très proches. Reste le lignite, pour lequel l'Ultime est encore loin.

Comme la France et l'Angleterre, l'Allemagne envisage une production de gaz et de pétrole de roches-mères, en Basse-Saxe et Rhénanie du Nord, mais sans en connaître vraiment les réserves, et connaît à ce propos une forte opposition des associations écologistes.

- *L'histoire de la production de pétrole aux Etats-Unis (figure 7)*

Comparés aux trois pays précédents, les Etats-Unis sont un immense pays très bien pourvu en ressources minérales. Ils possèdent en particulier de nombreuses «provinces pétrolières», bassins sédimentaires riches en gisements de pétrole.

La production de pétrole a connu un accroissement spectaculaire après 1900, à partir des gisements à terre (onshore) des US 48, c'est-à-dire à l'exclusion des Etats d'Hawaii et de l'Alaska (tous deux rattachés officiellement à l'Union en 1959). Elle a connu son pic en 1970 et depuis, elle connaît un déclin tempéré par la mise en exploitation de ressources situées dans de nouvelles provinces pétrolières: des gisements en mer (offshore), principalement ceux de Californie puis du golfe du Mexique, et les gisements de l'Alaska. Depuis quelques années se développe le pétrole de roches-mères (appelé pétrole de schistes par les médias), ressource potentielle déjà connue aux Etats-Unis mais dont l'exploitation a été permise dans des conditions rentables par les progrès technologiques (en particulier la fracturation hydraulique, qui permet d'augmenter la perméabilité de ces roches initialement trop peu perméables), mais aussi par l'augmentation récente du prix du pétrole. Les formations productrices sont surtout les formations de Bakken et Three Forks, d'âges Carbonifère Inférieur et Dévonien Supérieur, dans le bassin de Williston à la frontière avec le Canada, et la formation d'Eagle Ford, d'âge Crétacé Supérieur, au Sud de San Antonio au Texas. Le déclin a donc été enrayé et cela profite énormément à l'économie américaine.

Les Etats-Unis ne retrouveront sans doute pas le niveau de production pétrolière du pic de 1970, encore qu'ils s'en approchent rapidement, mais l'Ultime du pétrole y est encore loin d'être atteint. *Notons au passage que l'augmentation récente du prix du pétrole et les progrès du taux de récupération du pétrole, si souvent invoqués pour prédire un brillant futur à la production pétrolière mondiale, n'ont pas infléchi de manière sensible le déclin de la production des US 48, comme cela est également le cas pour la production de la Mer du Nord.*

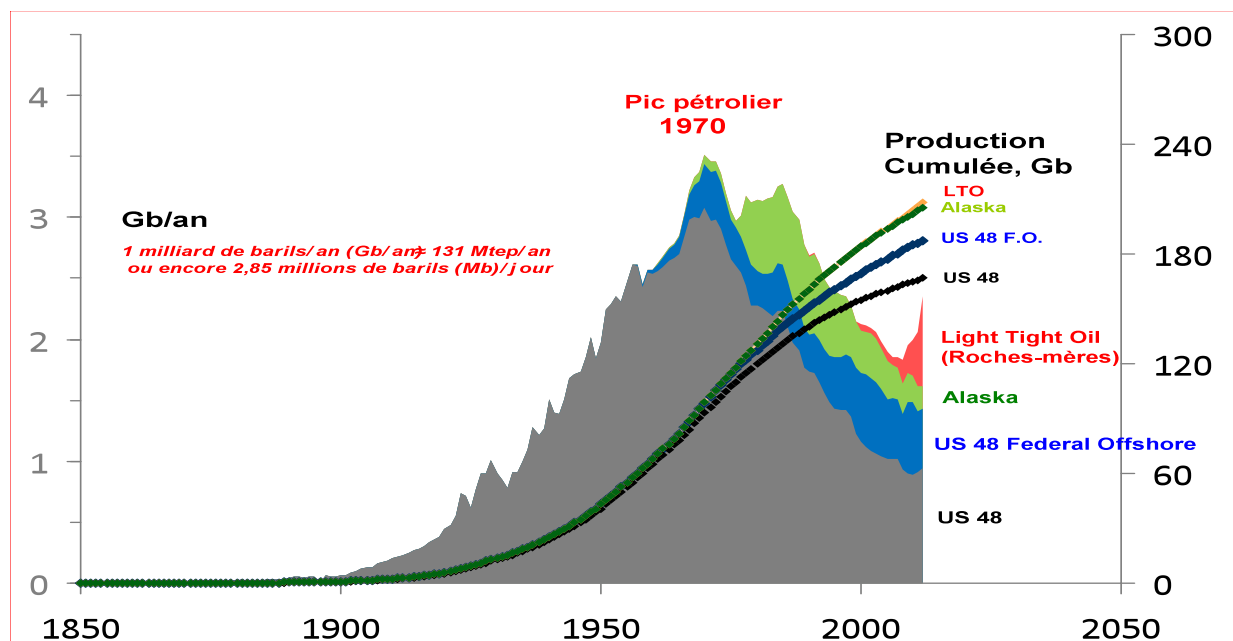


Figure 7: Production de pétrole des Etats-Unis de 1850 à 2011, en milliards de barils (Gb).

Le baril est l'unité la plus utilisée dans le monde pétrolier pour mesurer les quantités de pétrole. Il s'agit d'une unité de volume, qui vaut 159 litres. Courtoisie P.Brocorens.

- L'histoire de la production du pétrole au Canada (figure 8).

Le Canada est aussi un immense pays bien pourvu en provinces pétrolières. La principale d'entre elle est celle de l'Alberta, qui a connu son pic en 1972.

La production de l'Alberta a été relayée par celles d'autres provinces, Saskatchewan et Canada Oriental essentiellement. Cette dernière a connu son pic en 2007.

Mais surtout se développe depuis 1970 la production des bitumes (sables bitumineux, tar sands) de l'Alberta, qui sont des pétroles très lourds et visqueux. Ils proviennent de l'altération d'immenses gisements pétroliers portés progressivement à la surface par érosion des sédiments situés au-dessus d'eux. Les quantités en place sont énormes, comparables à celles de pétrole brut conventionnel initialement en place en Arabie Saoudite. Elles ont été répertoriées depuis fort longtemps mais, par rapport au pétrole d'Arabie Saoudite leur exploitation est beaucoup plus difficile, et coûteuse en énergie et en investissements. Elle n'a pu se développer dans des conditions de rentabilité économique que grâce au progrès technologique, mais plus encore à l'augmentation du prix du pétrole.

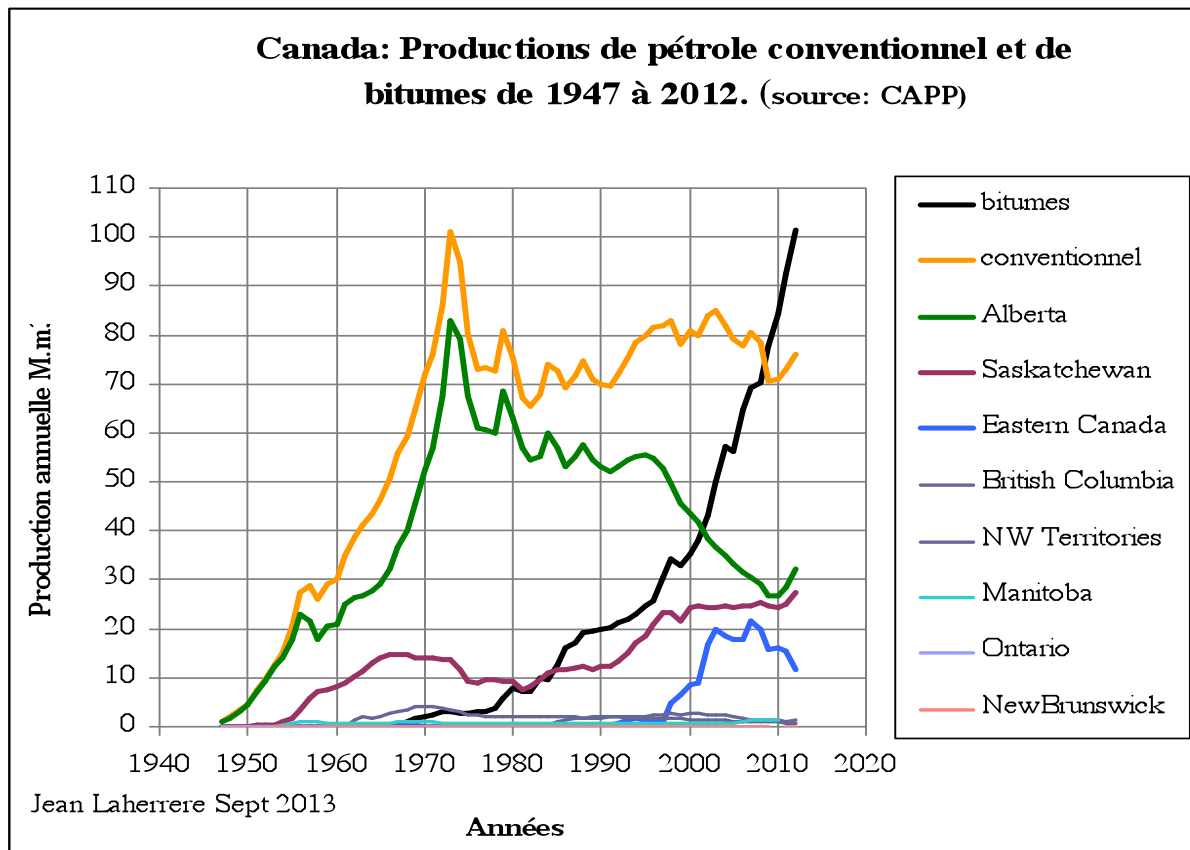


Figure 8: Histoire de la production de pétrole au Canada de 1947 à 2012. Les productions sont ici mesurées en millions de m^3 ($M.m^3$).

Elle ne peut progresser que lentement, en particulier parce que son exploitation relève pour beaucoup de techniques minières bien moins productives que des forages pétroliers classiques.

Ces pétroles très lourds sont appelés huiles extralourdes ou extralourds (EL), extra heavy oils (XH) dans la terminologie anglo-saxonne. On en trouve également de très grandes quantités

au Venezuela dans ce qu'on appelle la ceinture bitumineuse de l'Orénoque (Faja Bituminosa). Les huiles extralourdes du Venezuela, plus profondes, et moins visqueuses parce qu'à des températures plus fortes, sont un peu plus faciles à exploiter que les bitumes du Canada.

La production de pétrole de roches-mères commence à se développer, à l'imitation des Etats-Unis, en particulier au Saskatchewan, province qui partage le Bassin de Williston avec les Etats-Unis.

Extralourds et pétrole de roches-mères sont classés (mais pas toujours pour ce dernier, comme par exemple au Canada) dans ce qu'on appelle le pétrole non conventionnel. Le pétrole conventionnel, extractible par des techniques classiques (conventionnelles), est en quelque sorte le pétrole qui n'est pas non conventionnel, à l'exclusion donc des catégories ci-dessus.

Dans le pétrole conventionnel se trouve essentiellement le pétrole brut appelé aussi familièrement le brut, en Anglais crude oil ou crude, qui est extrait des «gisements conventionnels» après forage. Se trouve aussi, mais certains le classent dans le non conventionnel, le pétrole léger que l'on extrait des gisements de gaz, appelé liquides de gaz naturels (LGN), natural gas liquids (NGL) en Anglais).

L'ensemble pétrole conventionnel plus pétrole non conventionnel, constitue le pétrole «tous liquides». On y inclut souvent les biocarburants (biofuels) et même parfois les carburants liquides produits à partir de gaz (gas-to-liquids, GTL) ou de charbon (coal-to-liquids, CTL) ou les huiles produites par pyrolyse de schistes bitumineux tels que ceux d'Autun (shale-to-liquids, STL). Pourtant ces carburants et huiles sont des «pétroles synthétiques» qui n'ont rien à voir avec le pétrole sensu stricto, sinon qu'ils peuvent s'y substituer dans ses utilisations.

On y inclut aussi souvent (c'est par exemple le cas de l'Agence internationale de l'énergie, AIE) ce qu'on appelle les «gains» de raffinerie, qui ne correspondent pas non plus à une production pétrolière. Ils proviennent du fait que la production de pétrole et de produits pétroliers se mesure en barils. Or le baril est une unité de volume (159 litres) et non de masse. Comme le raffinage transforme le pétrole en «produits pétroliers» dont la masse volumique totale est inférieure à celle du pétrole initial, il y a donc augmentation de volume entre l'entrée en raffinerie et la sortie. C'est le «gain» de raffinerie, qui est comptabilisé en production, alors que c'est pourtant une perte d'énergie puisque la raffinerie consomme de l'énergie.

Cette comptabilité en volume a un autre effet pervers: le contenu moyen en énergie d'un baril a tendance à diminuer avec le temps, essentiellement à cause de la contribution de plus en plus grande de produits à énergie volumique relativement faible, les liquides de gaz naturel (LGN), qui contiennent une forte proportion de propane et de butane (gazeux dans les conditions normales, mais qui sont liquéfiés sous forme de gaz de pétrole liquéfiés (GPL)). C'est ainsi que l'on observe sur les statistiques de la BP statistical review, que l'unité de production la plus couramment utilisé, le million de baril par jour (Mb/j ou Mb/d) était passée en équivalent énergétique de 48,2 à 47,8 millions de tonne-équivalent-pétrole (Mtep) par an entre 2000 et 2012. Il était de 48,7 en 1965.

Notons au passage qu'aux Etats-Unis, le pétrole extrait de roches-mères est maintenant regroupé dans les statistiques avec le pétrole brut extrait depuis longtemps de réservoirs de très faible perméabilité sous la rubrique «light tight oil». Les techniques d'extraction, à base de fracturation hydraulique, sont à peu près les mêmes.

- L'exemple de l'Arabie Saoudite (figure 9)

La production de pétrole a démarré en Arabie Saoudite juste avant la deuxième guerre mondiale avec le premier puits réellement producteur, Damman 7, mis en production le 4 Mars 1938, et qui vient juste d'être fermé.

Elle a augmenté rapidement, particulièrement après 1970, date du pic de la production pétrolière aux Etats-Unis, et s'est alors progressivement substitué à ce pays comme principal gendarme du marché pétrolier mondial, dans le cadre de l'Organisation des pays exportateurs de pétrole (OPEP) créée en 1960. Cela explique les variations brutales de production observées de 1974 à 1985, qui correspondent aux chocs pétroliers de 1973 et 1979, et au contre-choc de 1986. Notons que les diminutions de production lors des chocs pétroliers ont été relativement faibles, ce qui montre qu'une faible diminution de production peut avoir des effets considérables en certaines circonstances. La diminution considérable de production de 1981 à 1985 avait pour but de maintenir les prix mondiaux à un niveau élevé, but qui n'a pas été atteint parce les pays importateurs ont réduit leur consommation, entre autres en remplaçant le pétrole par du nucléaire, du gaz ou du charbon dans la production d'électricité, et qu'un effort considérable d'exploration a pu relancer la production de pétrole hors OPEP. Les prix ont alors chuté et la consommation, donc la production, sont reparties à la hausse. A partir de 1991 l'Arabie Saoudite semble perdre progressivement sa capacité de maîtrise du marché mondial car elle a de plus en plus de difficultés à augmenter sa production à la demande. Elle peut donc encore faire augmenter les prix en diminuant son offre, mais guère les faire baisser en l'augmentant. Son pic de pétrole semble donc proche, mais son Ultime est encore loin !

Elle utilise de plus en plus de pétrole pour sa consommation intérieure, ce qui réduit d'autant ses capacités exportatrices. On verra que c'est aussi maintenant le cas de beaucoup d'autres pays exportateurs de pétrole.

L'Arabie Saoudite est également productrice de gaz. La production, encore négligeable en 1980, a augmenté de plus en plus rapidement depuis. Elle est intégralement consommée dans le pays.

L'Arabie Saoudite ne possède pas de gisement exploitable de charbon.

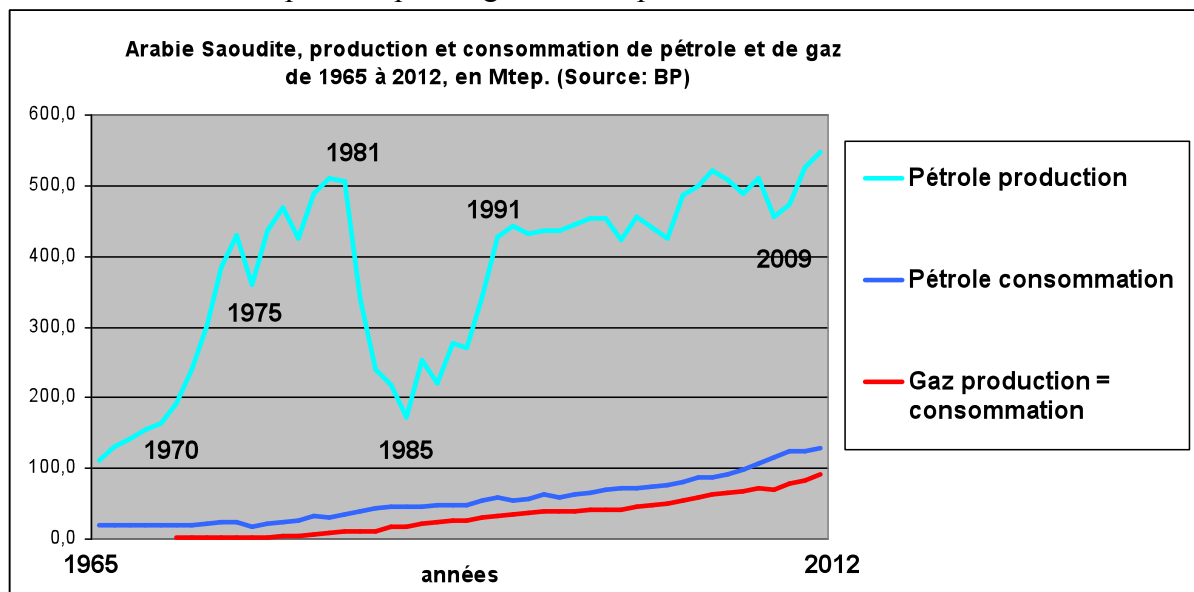


Figure 9: production de pétrole et de gaz naturel de l'Arabie Saoudite de 1965 à 2012.

2 – Les tendances actuelles

Nous allons maintenant analyser les tendances actuelles, en ce qui concerne les consommations, les productions et les imports-exports de combustibles fossiles. Nous nous appuyons pour cela sur l'examen de l'évolution dans ce domaine depuis 1981, des quatre ensembles qui étaient en 2012 selon la BP les plus consommateurs d'énergie de la planète: Les Etats-Unis, la Chine, la Fédération de Russie et l'EU 28, à laquelle nous agglomérerons la Norvège, producteur le plus important de pétrole et de gaz en Europe. Nous examinerons également le cas du Japon, gros importateur de combustibles fossiles, puis de la France. En 2012 cet ensemble a consommé 64 % de la consommation totale de combustibles fossiles de la planète (mais ne représentait que 36 % de sa population).

Nous examinerons plus particulièrement l'évolution à l'échelle mondiale de la production de pétrole, principal moteur actuellement de l'économie des pays développés, mais aussi de celle des quantités de pétrole mises sur le marché international, dont la France est entièrement tributaire.

- Les Etats-Unis (figures 10 et 11) :

Depuis 1981, date qui marque le paroxysme des conséquences des chocs pétrolier de 1973 et 1979, la consommation d'énergie primaire a augmenté d'un bon tiers aux Etats-Unis, et cela jusqu'en 2007, début de la crise initiée par celle dite des «Subprimes». Elle a diminué depuis d'environ 200 Mtep. Depuis 2005 environ, les consommations de pétrole et de charbon ont sensiblement diminué, tandis que celle de gaz a augmenté. Le pétrole reste toutefois l'énergie la plus consommée, et les Etats-Unis en sont encore les premiers consommateurs mondiaux. Notons à ce propos que les taxes sur les carburants étant faibles aux Etats-Unis, les variations de prix des carburants ont des amplitudes voisines de celles des prix du pétrole. Les consommateurs y réagissent donc plus fortement aux augmentations de prix qu'en Europe où les taxes ont fortes, en réduisant leur consommation.

La proportion de combustibles fossiles dans la consommation d'énergie primaire a un peu diminué, mais ils y restent cependant très majoritaires.

La production de pétrole, qui avait connu un important déclin jusqu'en 2008, connaît depuis lors une envolée spectaculaire, due au développement du pétrole de roches-mères. Celle de gaz, qui était en déclin après un maximum en 2001, est repartie fortement à la hausse en 2005, grâce au gaz de roches-mères. Celle de charbon, en dents de scie, a augmenté jusqu'en 1998, est ensuite en moyenne restée à peu près stable jusqu'en 2008, puis a décliné fortement, et cela malgré des exportations en forte hausse. Ce déclin est dû à sa substitution dans la production d'électricité par le gaz, dont le prix a chuté des 2/3 en 2008 et est resté très bas depuis cette date.

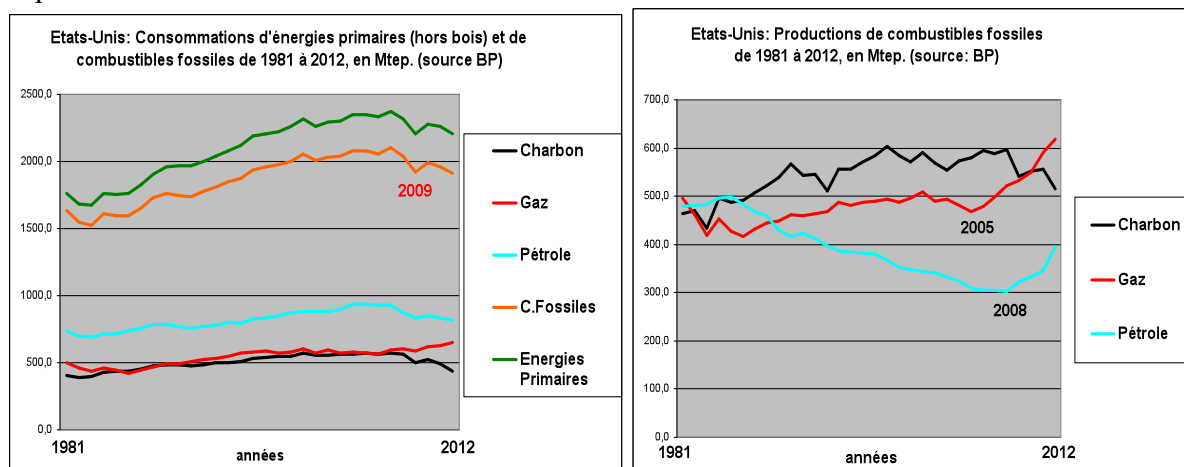


Figure 10: consommation et production de combustibles fossiles aux Etats-Unis de 1981 à 2012. Source: BP Statistical Review 2013.

Le bilan de ces évolutions de la consommation et de la production se lit sur la figure 11, qui montre l'évolution des importations et des exportations de combustibles fossiles: les importations de pétrole qui avaient considérablement augmenté depuis 1986, date du contrechoc pétrolier, ont spectaculairement diminué depuis 2005. Il en est de même des importations de gaz naturel. Les exportations de charbon, qui avaient progressivement diminué sont reparties à la hausse à partir de 2003. Tout cela est imputable au «boom» de l'exploitation du pétrole et du gaz de roches-mères, qui a donc un effet très bénéfique sur l'indépendance et la facture énergétiques des Etats-Unis.

La consommation de gaz est actuellement stimulée par son très bas prix. On a vu qu'en particulier le gaz se substitue de plus en plus au charbon dans la production d'électricité, qui est la principale utilisation de celui-ci. Pour protéger l'activité minière, les Etats-Unis exportent leur charbon au coût marginal.

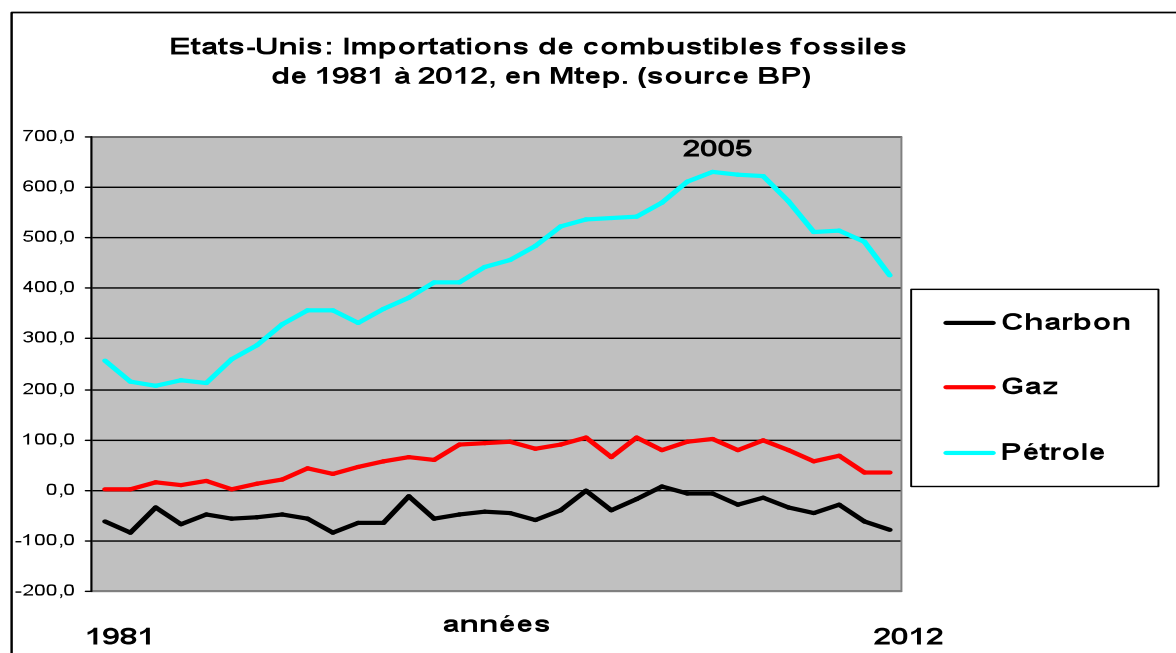


Figure 11: Etats-Unis, importations-exportations de combustibles fossiles de 1981 à 2012.

Un effet paradoxal est que les émissions de CO² des Etats-Unis sont en baisse parce que le gaz est beaucoup moins émetteur de CO² par kWh d'électricité produite. Mais le mouvement est inverse en Europe: celle-ci importe du charbon à bas coût des Etats-Unis, ce qui pousse les prix du charbon à la baisse et le rend moins coûteux que le gaz dans la production d'électricité. Ce phénomène est accentué par la production croissante d'électricité éolienne et solaire subventionnée et prioritaire sur les réseaux. Les centrales à gaz ne produisent plus un nombre d'heures suffisantes pour être rentables: elles sont maintenant nombreuses à être fermées ou mises sous cocon en attendant des jours meilleurs. Paradoxalement l'Europe et en particulier l'Allemagne qui ferme ses centrales nucléaires, produit de plus en plus d'électricité à partir de charbon!

S'installe donc actuellement à l'échelle mondiale un jeu de chaises musicales qui a de profonds effets sur les échanges de combustibles fossiles, ainsi que sur les industries du raffinage et de la pétrochimie, mais aussi sur la géopolitique: les Etats-Unis important moins de pétrole, ils sont moins dépendants des pays exportateurs, et pourraient se désintéresser du Moyen-Orient. Un faible prix du gaz, mais aussi des hydrocarbures légers (éthane, propane, butane) qui sont la matière première (naphta) de la pétrochimie permet à celle-ci et plus généralement aux industries très énergivores des Etats-Unis de devenir bien plus

compétitives. L'Europe, dont les prix sont devenus relativement plus élevés, va probablement en souffrir. Elle aura aussi de plus en plus de mal à continuer d'exporter son essence, excédentaire du fait de l'importance du diesel en Europe et particulièrement en France, vers les Etats-Unis comme elle le fait actuellement, ce qui va peut-être conduire à plus taxer le diesel pour éviter de fermer des raffineries.

Ce phénomène pourrait cependant n'être que provisoire, les productions de gaz et de pétrole de roches-mères aux Etats-Unis semblant devoir connaître, avec les techniques actuelles, leur pic dans moins d'une dizaine d'années (voir à ce sujet l'analyse de D.Hugues ¹). Mais peut-être les progrès technologiques, en particulier grâce à l'amélioration des procédés de fracturation, pourront-ils rendre cette production plus durable. Actuellement sont par exemple expérimentés aux Etats-Unis et au Canada des procédés de fracturation au propane, qui non seulement permettraient de se passer d'eau, mais aussi amélioreraient la récupération du pétrole et du gaz. D'autres fluides de fracturation, comme le gaz naturel liquéfié ou le CO² liquide, sont envisagés. L'amélioration des techniques de sismique permet aussi de mieux cibler les zones potentiellement les plus productives et d'économiser des forages, améliorant ainsi l'économie des procédés.

Notons aussi que les Etats-Unis possèdent d'immenses quantités de «schistes bitumineux», analogues aux Schistes d'Autun exploités en France jusqu'un peu après la deuxième guerre mondiale : Ce sont des roches très riches en matière organique n'ayant pas été suffisamment enfouies pour avoir produit du pétrole et du gaz, mais se trouvant à des profondeurs suffisamment faibles pour être exploitables en carrières ou en découvertes, et à partir desquelles on peut produire de l'huile de schistes (shale oil, shale-to-liquids, STL) par pyrolyse à des températures de 5 à 600°C.

Il s'agit essentiellement des Green River Shales, non exploités actuellement, qui s'étendent sur les Etats du Colorado, de l'Utah et du Wyoming. Ils seront peut-être un jour la source de «pétrole synthétique» sous forme de STL, si le prix du pétrole atteint des valeurs beaucoup plus élevées qu'actuellement.

- La Chine (figures 12 et 13)

La Chine a connu depuis 1981 une croissance extraordinaire de sa consommation d'énergie primaire, en très bonne corrélation comme il fallait s'y attendre avec sa croissance économique. Il s'agit essentiellement de combustibles fossiles, et tout particulièrement de charbon, dont la Chine est maintenant de très loin le premier consommateur mondial.

La consommation de pétrole a quant à elle connu une croissance exponentielle, en corrélation avec l'entrée de la Chine dans la civilisation de l'automobile. Elle devrait sauf accident dépasser la consommation des Etats-Unis en 2015.

La consommation de gaz n'a commencé à croître qu'à la fin des années 90 et reste modérée. Côté production, la production de charbon est de très loin la première au monde, environ 47 % de la production mondiale en 2012. Celles de pétrole et de gaz s'essouffent, faute de ressources suffisantes.

Au bilan (figure 13), la Chine, initialement exportatrice de pétrole, est devenue importatrice à partir de 1993, et cela de façon exponentielle. Ses importations égalaient sa production dès 2010. Elle importera probablement en 2013 plus de pétrole que les Etats-Unis.

Et elle est depuis peu importatrice de charbon et de gaz. La Chine est donc de plus en plus dépendante des marchés internationaux, pour le pétrole et le gaz, mais également pour le charbon dont elle est en passe de devenir le premier importateur mondial.

Une remarque en passant à propos de la croissance chinoise: celle du PIB a été annoncée à plus de 7% pour 2013. Imaginons que cette croissance se poursuive indéfiniment au rythme de 7 % par an. Le PIB serait multiplié par 360 à la fin du siècle, et en admettant que l'efficacité énergétique s'améliore de 1 % par an, la consommation énergétique serait alors

multipliée par 160 ! En fait, c'est inimaginable, et une diminution du taux de croissance, progressive ou brutale, est à prévoir bien avant.

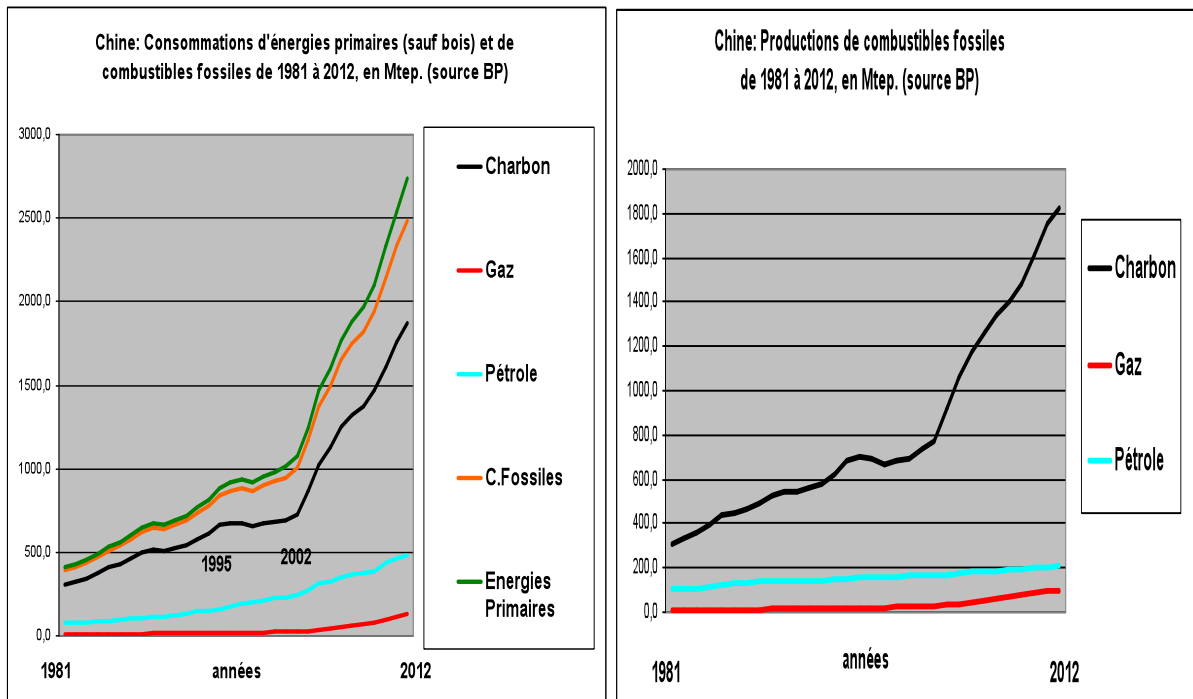


Figure 12: Chine : consommation et production de combustibles fossiles de 1981 à 2012.

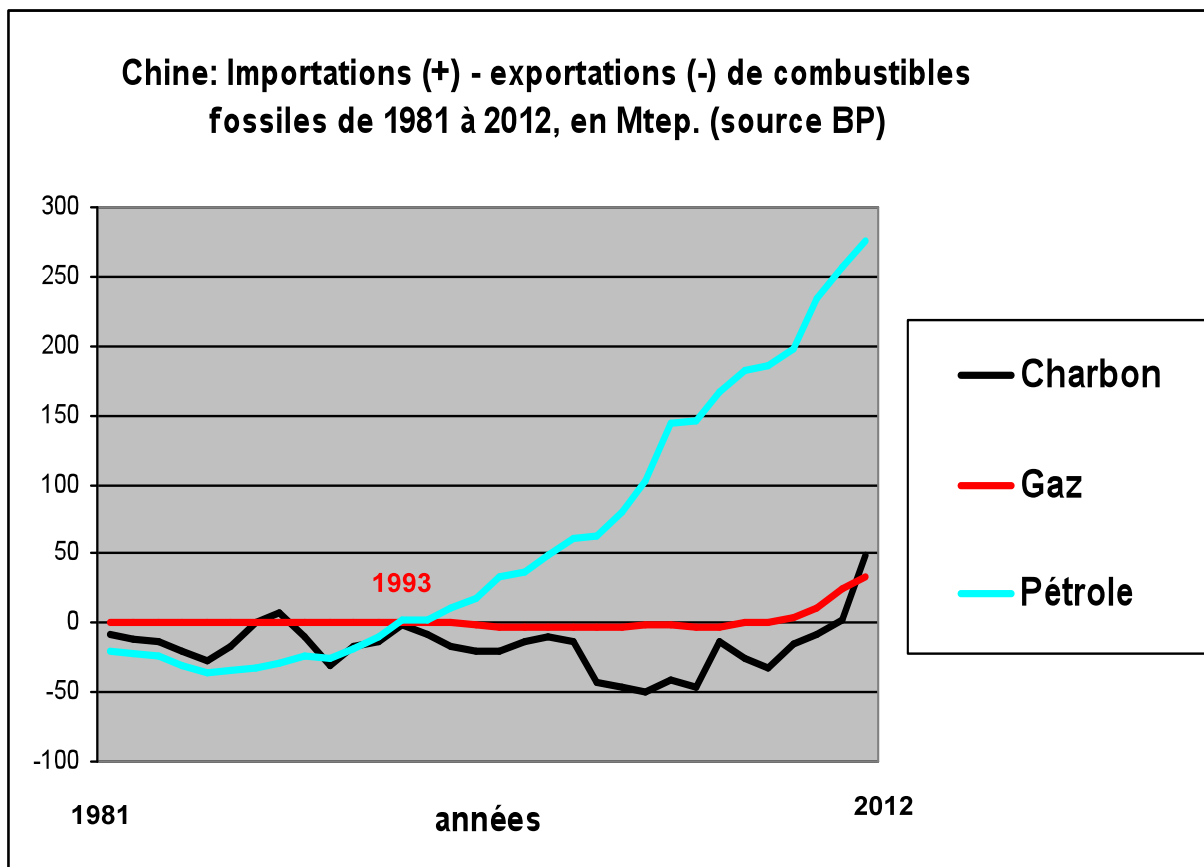


Figure 13 : Chine : Importations et Exportations de combustibles fossiles de 1981 à 2012.

- La Fédération de Russie (figures 14 et 15)

Les données de la BP sur la Fédération de Russie en tant qu'ensemble ne débutent qu'en 1985. La consommation d'énergie primaire (figure 14) consiste essentiellement en combustibles fossiles et la consommation de gaz y tient de loin la place la plus importante. Toutes les consommations ont très fortement décliné après 1989, date de la désintégration de l'Union Soviétique, et n'ont repris qu'après une traversée du désert d'une dizaine d'années. La reprise a été ensuite lente. Cela se corrèle bien avec une stagnation de l'économie pendant cette période. C'est surtout la consommation de gaz qui a augmenté.

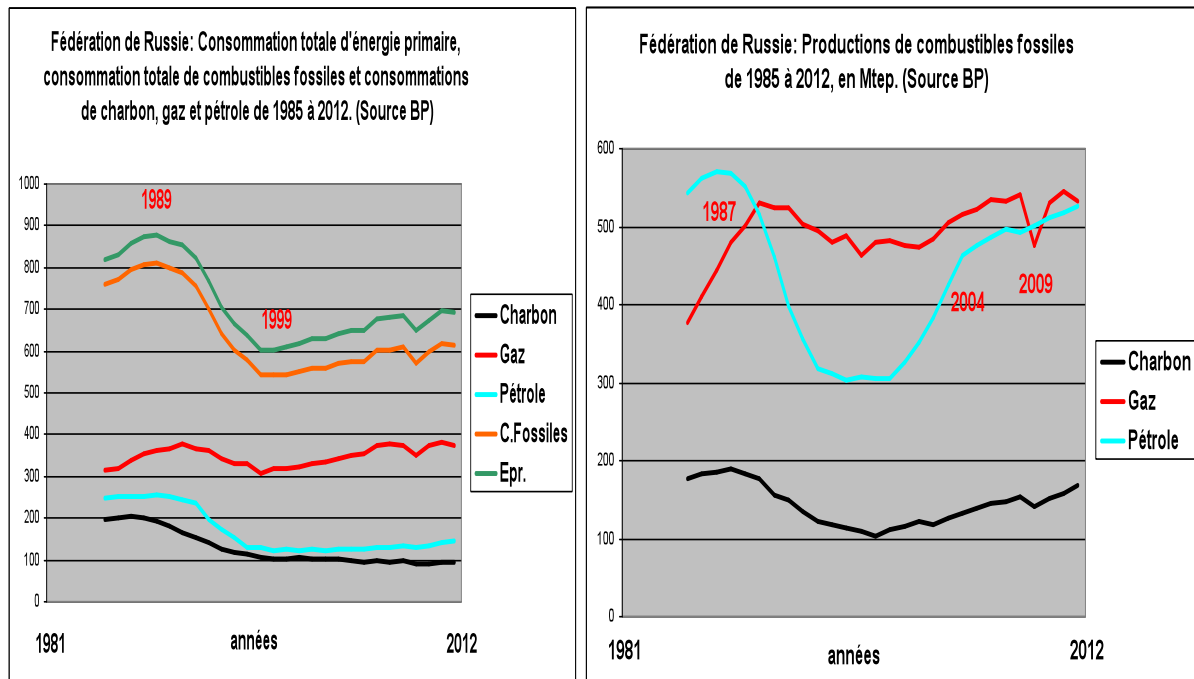


Figure 14 : Fédération de Russie : Consommations et productions de combustibles fossiles de 1985 à 2012.

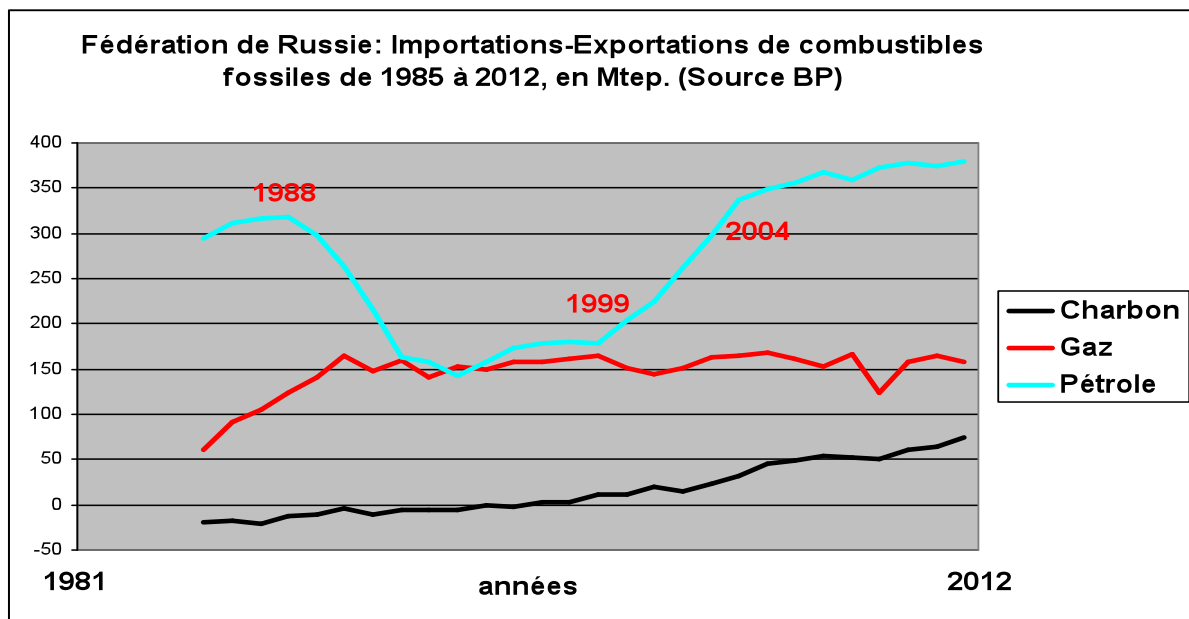


Figure 15 : Fédération de Russie : bilan des Imports-Exports de combustibles fossiles de 1985 à 2102.

Les productions (figure 14) ont également beaucoup chuté pendant cette traversée du désert, en particulier celle de pétrole. Celle-ci a ensuite repris vigoureusement, mais n'a toujours pas rejoint le maximum atteint en 1987. On observe aussi une cassure du rythme de croissance en 2004, qui pourrait signifier que le pic du pétrole sera bientôt atteint. En attendant, la Fédération de Russie rivalise avec l'Arabie Saoudite pour le titre de premier producteur mondial de pétrole.

Au bilan (figure 15), la Fédération de Russie est un très grand exportateur de combustibles fossiles et surtout de pétrole et de gaz, et semble avoir choisi de le rester plutôt que de développer sa consommation intérieure et donc son économie. Cette politique risque de trouver assez vite ses limites si le pic du pétrole est en vue, et si la contestation intérieure pour une meilleure qualité de vie prend de la vigueur.

- L'EU28 + la Norvège (figures 16 et 17)

Comparée aux Etats-Unis, à la Chine et à la Fédération de Russie, c'est l'EU 28 qui a fait les plus grands efforts pour moins dépendre des combustibles fossiles, avec un succès très relatif puisque ceux-ci y représentent encore aujourd'hui 78 % de la consommation d'énergie primaire hors bois (figure 3). Pour la Norvège, très bien pourvue en énergie hydraulique, elle n'est que de 32 %, du fait essentiellement de sa consommation de pétrole.

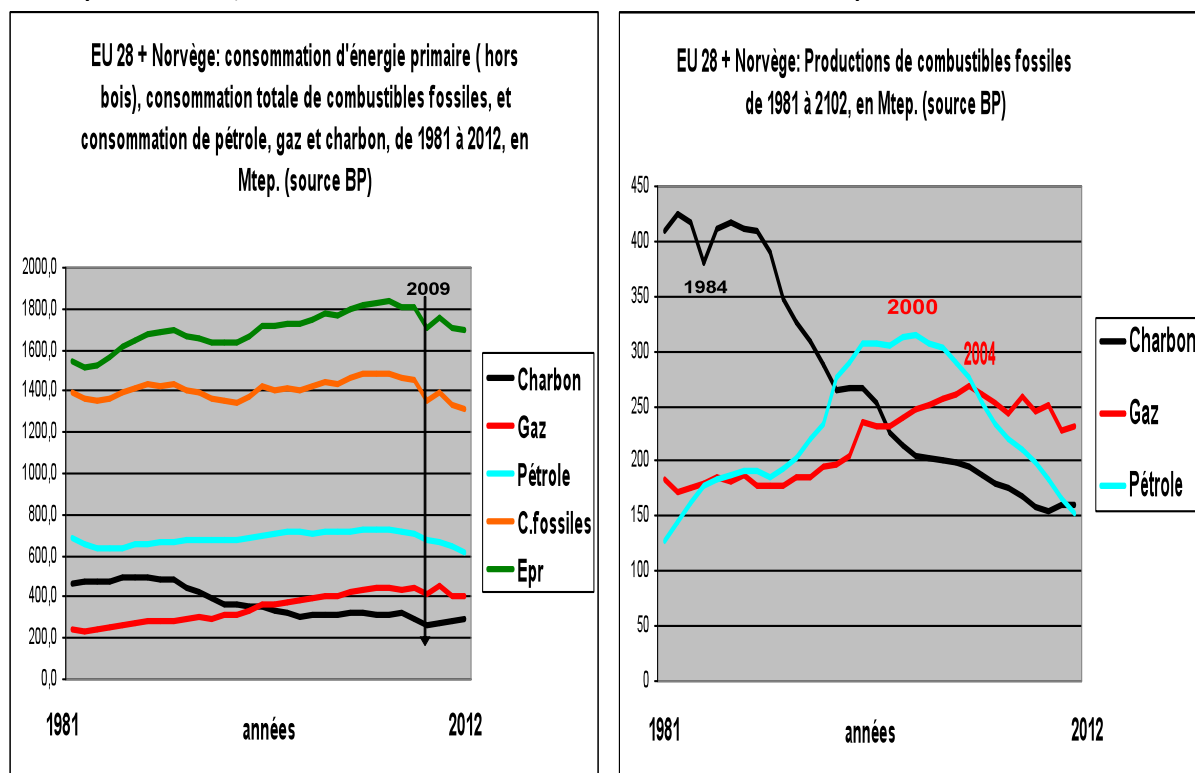


Figure 16: EU28 + Norvège : consommation et production de combustibles fossiles de 1981 à 2102. Par charbon, on entend ici houille (hard coal) plus lignite (brown coal)

La consommation de combustibles fossiles, à peu près stable depuis 1981, a sensiblement décliné à partir de 2007 (figure 16). Cela est dû essentiellement à une diminution de la consommation de pétrole. Celle de gaz, qui avait beaucoup augmenté jusqu'en 2000, a stagné depuis. Celle de houille et lignite, qui avait beaucoup diminué suite à la réunification allemande, a également stagné. Elle augmente à nouveau depuis 2009.

Les productions (figure 16) ont connu des évolutions contrastées. Dans celle de charbon et lignite, on voit la trace de la grève des mineurs anglais en 1984. Cette production a ensuite décliné rapidement. Elle est à nouveau en hausse, légère, depuis 2009.

La production de pétrole a augmenté considérablement jusqu'en 2000 et décroît très rapidement depuis. Ce phénomène est dû à la mise en exploitation, puis au déclin des gisements de la Mer du Nord.

La production de gaz a augmenté jusqu'en 2004, et décliné depuis. Là encore, cela est dû à la mise en production, puis au déclin, des gisements de la Mer du Nord.

Les productions de pétrole brut et de gaz conventionnels n'ont donc plus beaucoup d'avenir en Europe. En ce qui concerne le charbon, hormis la Pologne qui a toutefois connu son pic du charbon en 1987, son avenir est très limité pour le «hard coal» extrait des mines souterraines. Mais la production de lignite (brown coal) à ciel ouvert est en augmentation.

Qu'en est-il du pétrole et du gaz de roches-mères? Le «boom» américain fait des envieux en Europe, d'autant plus que comme expliqué plus haut, il va dynamiser l'industrie américaine et faire perdre de la compétitivité à l'industrie européenne ! Mais la situation géologique y est très différente: il n'y a pour l'instant aucune preuve tangible de l'existence de pétrole et de gaz de roches-mères en quantités notables malgré des annonces fracassantes. La Pologne, annoncée comme ayant de très fortes réserves, et où la prospection a commencé, doit déchanter. Ajoutons que les chances d'avoir du pétrole ou du gaz de roches-mères en quantités importantes dans des pays où l'on a jamais découvert de gisements importants de pétrole ou de gaz conventionnel est faible, car avant d'avoir du pétrole et du gaz de roches-mères, il faut qu'il existe des roches-mères suffisamment productives.

L'opposition des mouvements écologiques est très forte et le fait que l'Etat y soit propriétaire du sous-sol n'encourage pas les propriétaires du sol à se lancer dans l'aventure.

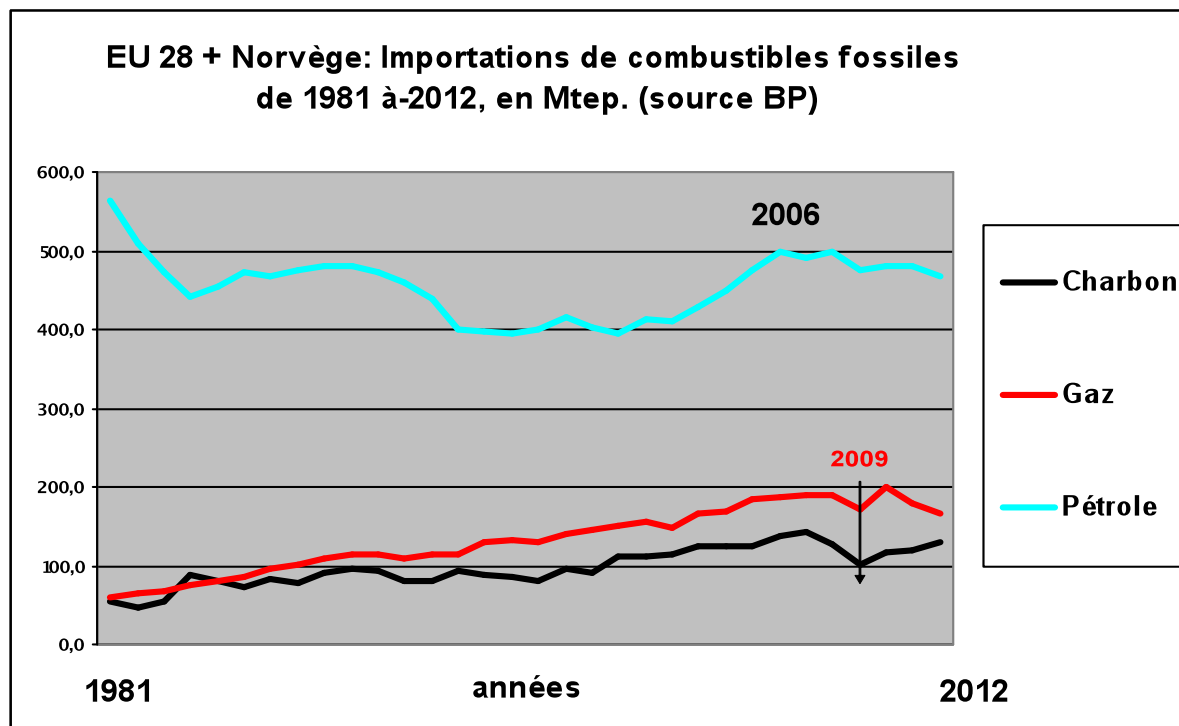


Figure 17: importations de combustibles fossiles en EU 28 + Norvège de 1981 à 2012

Le bilan (figure 17) est inquiétant: les importations de charbon et de gaz ont connu une forte augmentation jusqu'en 2007. Après une chute en 2009 due à la crise économique, on observe une hausse de celle du charbon et une diminution à peu près symétrique de celle du gaz. Cela

est dû à la mise sous cocon ou à la fermeture de centrales électriques à gaz, cher en Europe, au profit de centrales à charbon utilisant du charbon peu coûteux importé des Etats-Unis, en particulier en Allemagne pour compenser la fermeture des centrales nucléaires. C'est donc un «dommage collatéral» du boom des gaz de roches-mères aux Etats-Unis. Mais c'est aussi, comme expliqué plus haut, un dommage collatéral d'une production croissante d'électricité éolienne et solaire subventionnée et prioritaire sur les réseaux !

Les importations de pétrole, après un fort déclin dû à l'exploitation des gisements de pétrole en Mer du Nord, sont reparties à la hausse de 2003 à 2006. Elles ont ensuite un peu baissé à cause de la crise économique, mais il paraît logique qu'elles augmentent à nouveau, étant donné la rapidité du déclin de la mer du Nord.

L'EU 28 est donc devenue très dépendante des marchés internationaux et en particulier de pétrole, dont elle est actuellement le premier importateur mondial en tant qu'ensemble géopolitique. En son sein la Zone Euro, dont ne font partie ni le Royaume-Uni ni la Norvège, seuls producteurs importants de pétrole et de gaz en Europe, est dans une situation très mauvaise. Compte tenu du prix du pétrole, sa facture énergétique est très préoccupante, et les conséquences d'une augmentation rapide des prix ou d'une rupture d'approvisionnement y seraient catastrophiques.

- *Le Japon (figure 18)*

Le cas du Japon est simple et inquiétant: les combustibles fossiles y représentent depuis longtemps l'essentiel de la consommation d'énergie primaire. Il avait cependant réussi à diminuer cette dépendance grâce au nucléaire. Mais ces progrès ont été annihilés après Fukushima, suite à l'arrêt de la production nucléaire. Or le Japon n'a plus de réserves de combustibles fossiles (en 1981, la production de charbon était cependant de 11 Mtep. Elle est presque nulle aujourd'hui). La consommation d'énergie se confond donc pratiquement avec les importations de combustibles fossiles. Ce pays est donc aujourd'hui plus que jamais vulnérable à une crise d'approvisionnement, et sa situation est maintenant plus risquée qu'avant Fukushima! Il suffit par exemple d'un blocus temporaire de ses routes d'approvisionnement, par la Chine par exemple.

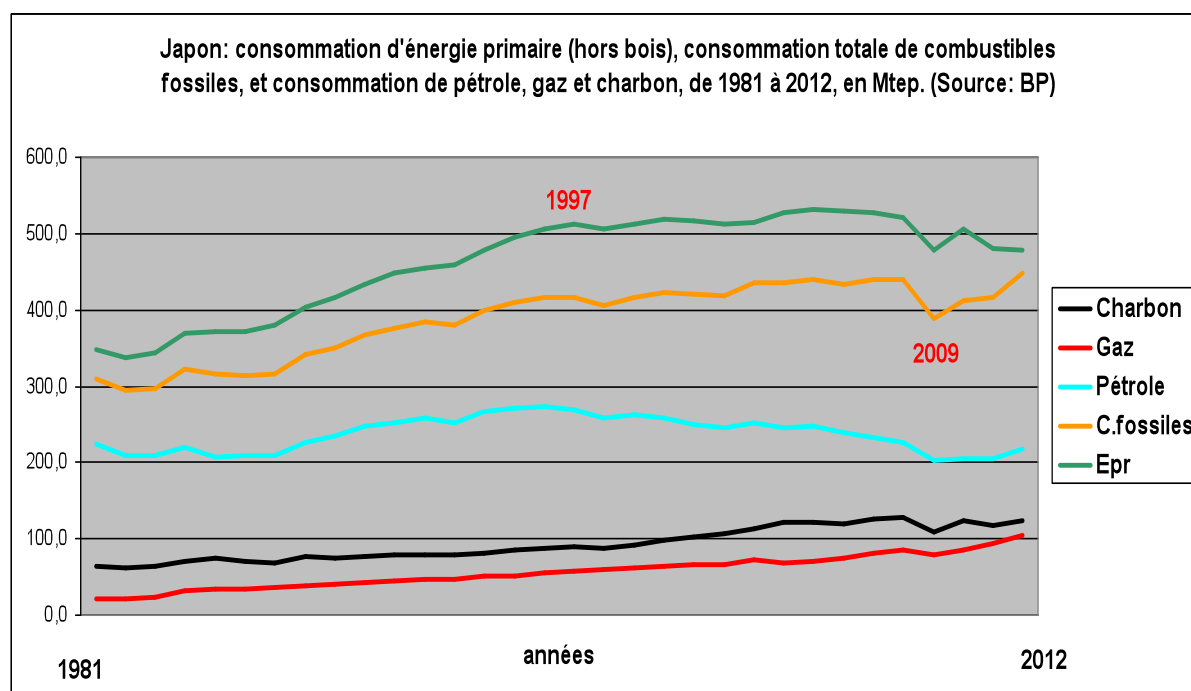


Figure 18 : consommations de combustibles fossiles au Japon de 1981 à 2012.

D'autre part, la consommation d'énergie primaire, qui avait beaucoup augmenté après le contrechoc pétrolier de 1986, a commencé à stagner en 1997, ce qui se corrèle parfaitement avec la stagnation de son économie depuis.

On observe un effort pour diminuer la consommation de pétrole depuis 1995. Mais celle-ci reste malgré tout très importante. Les consommations de gaz et de charbon ont connu des augmentations importantes et assez régulières depuis 1981.

- *La France (figures 19 et 20)*

De tous les grands pays développés, la France est celui où la proportion de combustibles fossiles dans la consommation d'énergie primaire est devenue la plus faible, grâce au nucléaire (figures 3 et 19). Mais la consommation de combustibles fossiles n'a pas beaucoup varié depuis 1981 et il s'agit surtout de pétrole.

On observe cependant une diminution depuis 2006, qui est due à la crise économique et au prix du pétrole, mais aussi à des changements de comportement et aux actions gouvernementales (bonus-malus à l'achat des voitures en particulier).

Les consommations de pétrole et de charbon ont diminué, mais celle de gaz a augmenté. Au cours de cette période, les productions de combustibles fossiles ont été faibles et ont décliné sauf pour le pétrole qui a connu son pic en 1988. Elles sont maintenant insignifiantes.

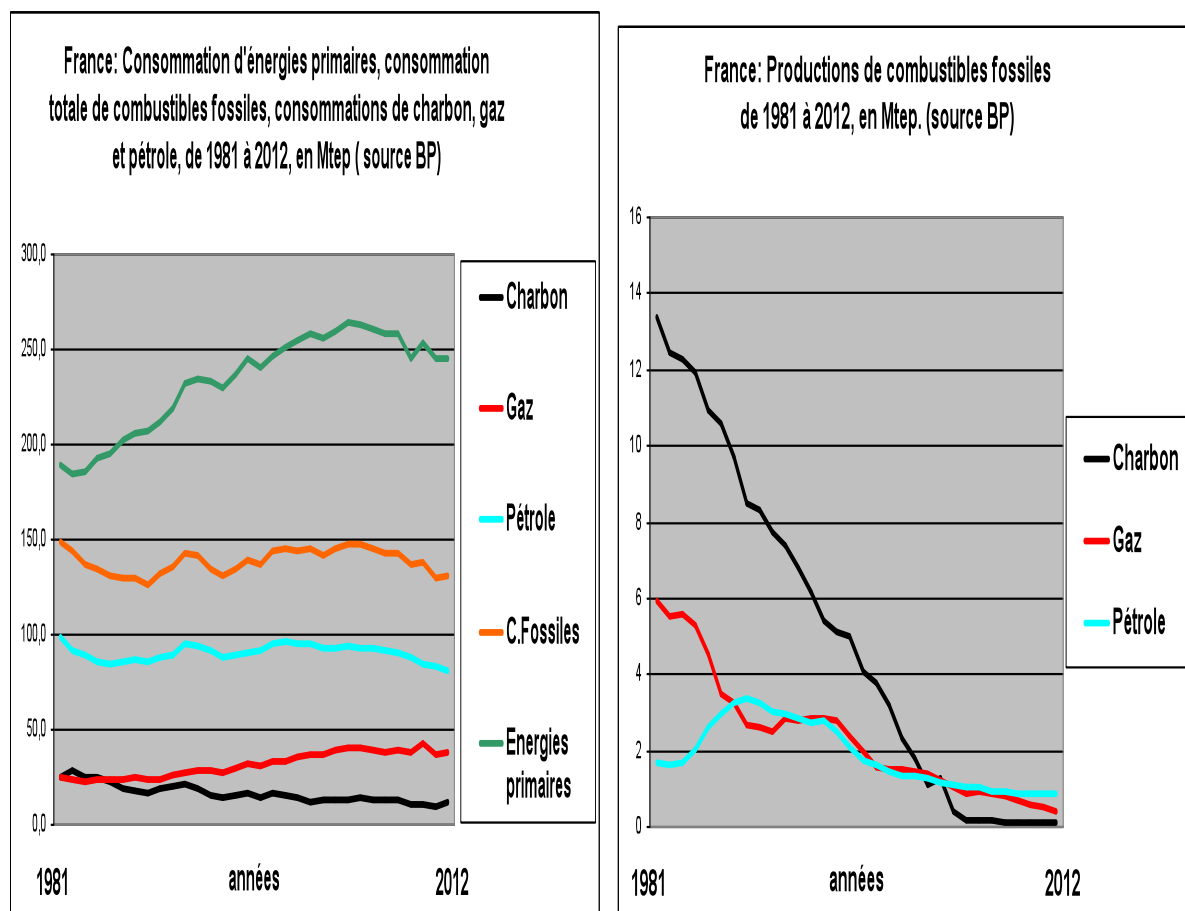


Figure 19 : consommations et productions de combustibles fossiles en France de 1981 à 2012.

Au bilan (figure 20), la France importe pratiquement tout ce qu'elle consomme. Sans le nucléaire, elle connaîtrait donc une situation à la Japonaise. Elle dépend presque

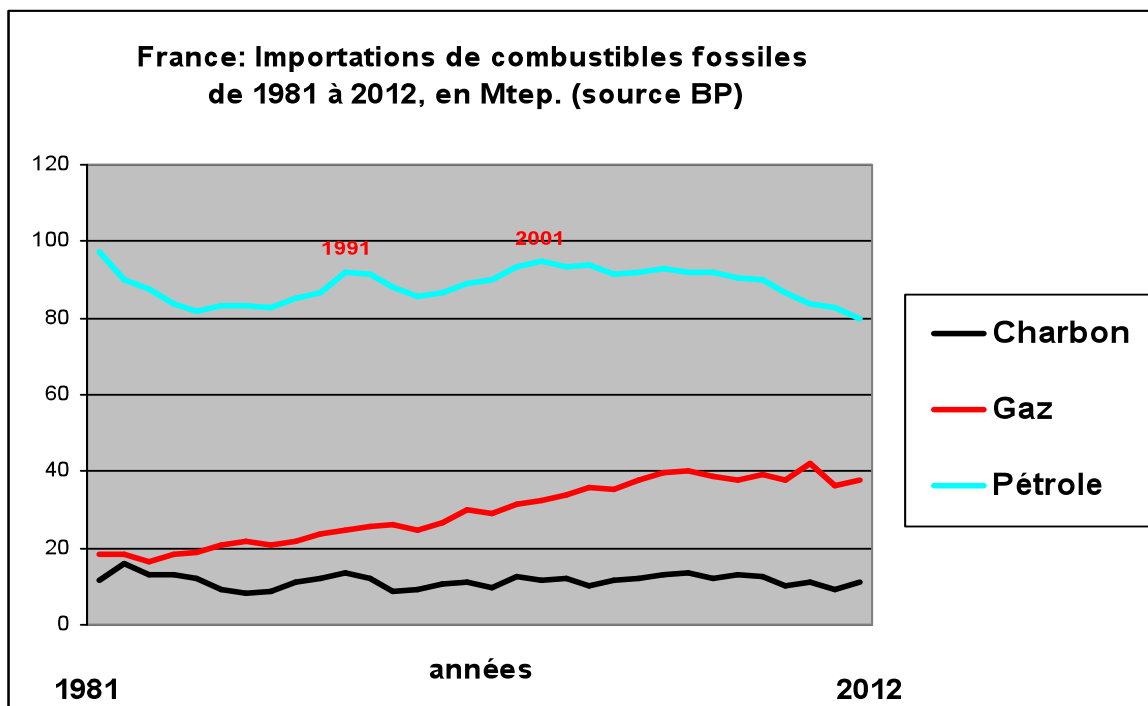


Figure 20: France : Importations de combustibles fossiles de 1981 à 2012

exclusivement des marchés internationaux, et sa facture énergétique est préoccupante : de 65 à 70 milliards d'euros depuis quelques années, elle est de l'ordre de grandeur du déficit de la balance commerciale. Elle est en particulier très vulnérable à la disponibilité et au prix du pétrole sur le marché international. Et elle aggrave son cas en maintenant une fiscalité moins élevée sur le gazole que sur l'essence, augmentant ainsi le manque à gagner de l'Etat.

- Le bilan de la production et des importations et exportations de pétrole à l'échelle mondiale (figure 21) :

C'est à la disponibilité et au prix du pétrole que les économies des pays de la zone Euro, y compris la France malgré son nucléaire, sont les plus sensibles. Il est clair que des augmentations considérables de prix ou des ruptures durables d'approvisionnement auraient sur ces pays des conséquences catastrophiques. Il est donc utile d'analyser l'évolution actuelle de cette disponibilité:

La production mondiale de pétrole, qui avait beaucoup augmenté de 1985 à 2005, a marqué une pause de 2005 à 2009. ***Depuis, elle augmente à nouveau, mais cela est dû uniquement à une augmentation de la production de liquides de gaz naturel (LGN), corrélativement à l'augmentation de la production de gaz, et du pétrole non conventionnel, bitumes du Canada et pétrole de roches-mères des Etats-Unis principalement.***

La production de pétrole brut conventionnel est en stagnation sinon en légère diminution depuis 2006. Il est généralement admis qu'elle aurait atteint son pic mondial à cette date et qu'après un plateau plus ou moins long son déclin devrait s'accélérer.

Un élément aggravant cette situation, peu évoqué par les médias, est que la quantité d'énergie nécessaire à la production du pétrole est en augmentation de plus en plus rapide, étant donné les difficultés techniques de plus en plus grandes de cette production. On estime qu'à l'heure

actuelle il faut l'équivalent en énergie (sous forme de pétrole, mais aussi de gaz ou d'électricité le plus souvent fournie par du charbon) de 5 à 10 % de l'énergie contenue dans le pétrole extrait pour le chercher et surtout pour le produire, contre 1% il y a 50 ans. Et cette proportion est plus forte, de l'ordre du quart, pour le pétrole non conventionnel, bitumes et huiles extralourdes, pétrole de roches-mères, que pour le pétrole brut conventionnel. C'est d'autant moins d'énergie qui peut être mis à la disposition du consommateur.

Le développement du pétrole non-conventionnel (bitumes et huiles extralourdes, pétrole de roches-mères), et des liquides de gaz naturels (LGN) sera donc la clef d'une éventuelle augmentation de la production de pétrole au niveau mondial. Pourra-t-il être suffisant pour compenser le déclin en cours du pétrole brut conventionnel, et pour combien de temps ? Et les quantités d'énergie de plus en plus importantes qui seront nécessaires pour produire le pétrole ne vont-elles pas conduire corrélativement à un écart croissant entre production de pétrole et quantités d'énergie réellement livrées aux consommateurs ?

Les exportations de pétrole, c'est-à-dire les quantités mises sur le marché mondial stagnent depuis 2004. C'est extrêmement préoccupant pour des pays qui comme la France, la plupart des pays européens ou d'autres pays dépourvus de ressources comme le Japon ou la Corée du Sud, dépendent entièrement de ce marché pour leur approvisionnement en pétrole. Un déclin rapide des quantités disponibles pour ces pays est prévisible par un «effet ciseaux»:

- ***d'une part une croissance rapide de la consommation interne des pays exportateurs, à l'exemple de l'Arabie Saoudite (figure 9). Celle-ci est due à trois causes: - l'augmentation de la population - la recherche de meilleures conditions de vie malgré cette augmentation - un encouragement à la consommation de pétrole par des subventions sous forme de prix intérieurs très bas par rapport aux cours mondiaux.***
- ***d'autre part la croissance exponentielle des importations de la Chine et de l'Inde, pressées d'entrer dans la civilisation de l'automobile.***

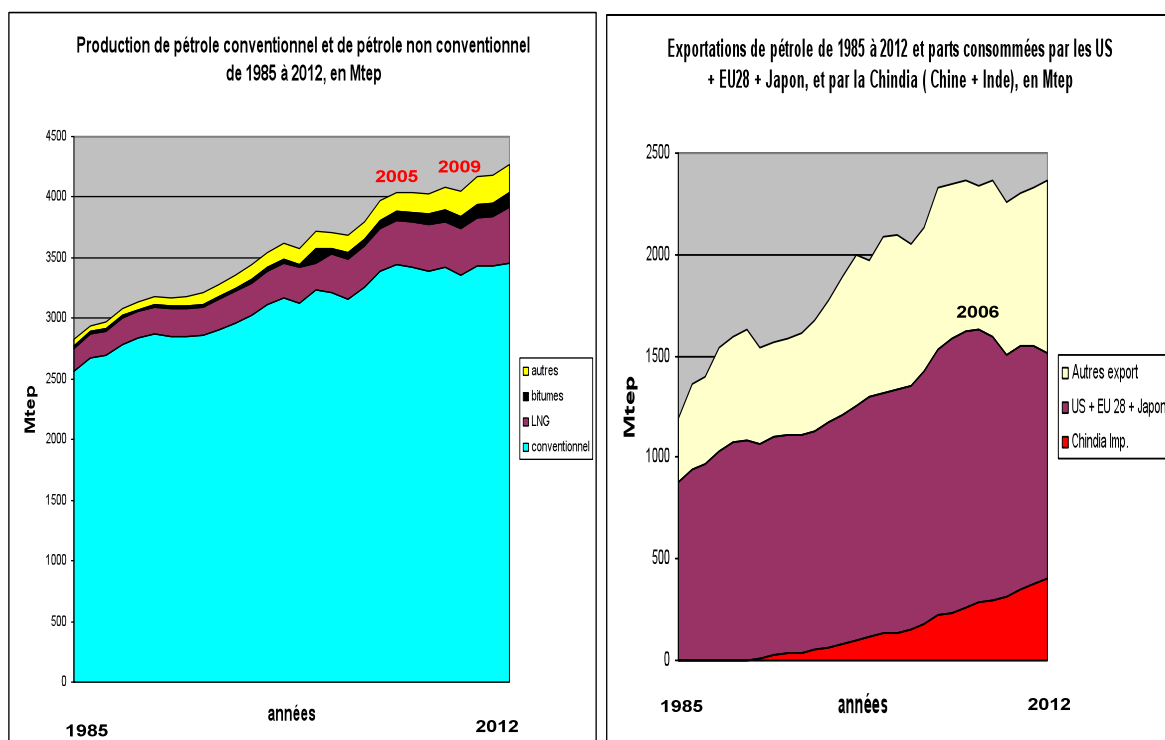


Figure 21: production et exportations mondiales de pétrole de 1985 à 2012.

La forte diminution des importations des Etats-Unis joue cependant en sens inverse depuis 2006. Elle est due, on l'a vu, au «boom» du pétrole de roches-mères dans ce pays. Mais jusqu'à quand pourra durer cette compensation ?

3 – Un exercice de prospective

La figure 22 montre les prévisions de la demande mondiale de pétrole d'ici 2035 faites en 2012 par l'Agence internationale de l'énergie (AIE, en Anglais International Energy Agency, IEA), et les moyens, toujours selon l'AIE, qui permettront de la satisfaire.

La demande mondiale augmenterait jusqu'à atteindre 104 millions de barils par jour (Mb/j) en 2035, soit presque 5 Gtep, alors qu'elle n'était que de 4,1 Gtep fin 2012.

Les prévisions des moyens qui seront mis en œuvre pour satisfaire cette demande paraissent bien optimistes, comme l'ont d'ailleurs été depuis maintenant presque 20 ans les prévisions de l'AIE dans ce domaine, qui ont été systématiquement bien au-dessus de la réalité.

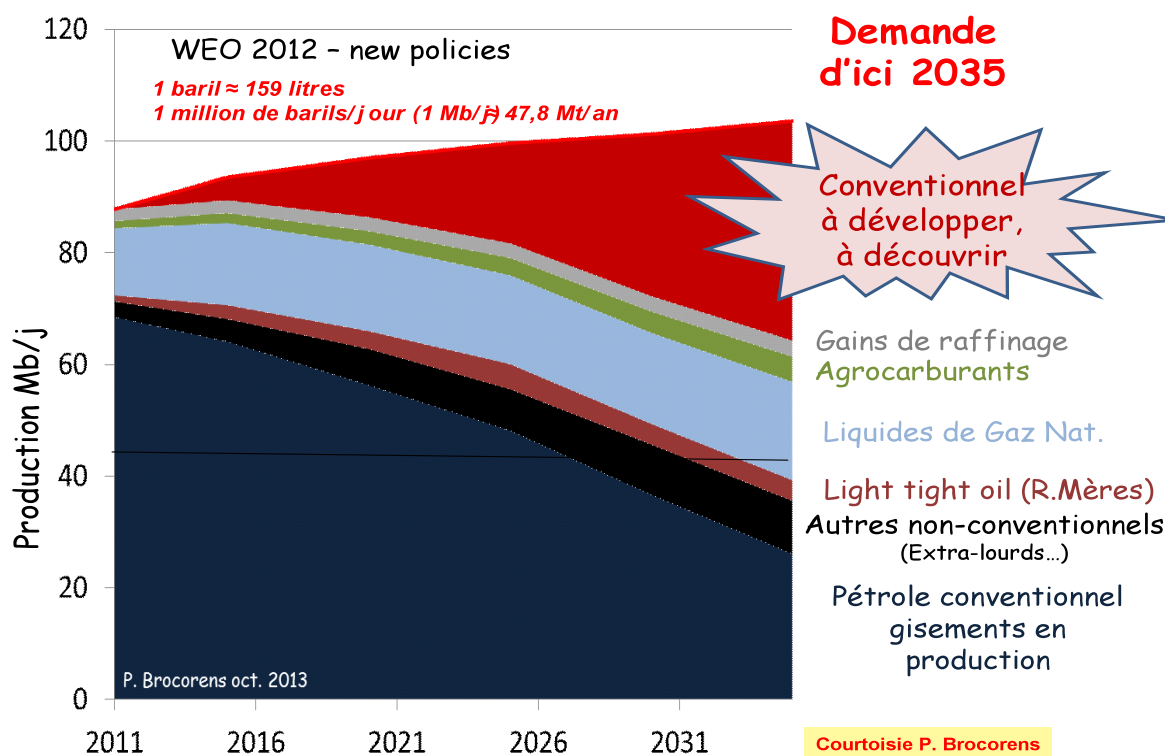


Figure 22: prévisions de la demande de pétrole mondiale d'ici 2035 et des moyens pour la satisfaire, selon l'AIE dans son scénario «New Policies» du World Energy Outlook (WEO) 2012.

Voici pourquoi: si le déclin des gisements actuellement exploités de pétrole brut conventionnel, et l'évolution de la production du pétrole non conventionnel et des liquides de gaz naturel, semblent assez réalistes encore qu'optimistes, l'augmentation de la production de pétrole brut conventionnel par la mise en production de gisements actuellement en cours de développement ou de gisements à découvrir ne l'est pas. Elle suppose en effet que d'ici 2035, l'industrie pétrolière aura pu mettre en production l'équivalent de 3 fois la production actuelle de l'Arabie Saoudite! Cela paraît vraiment peu probable.

La figure 23 est une vision de l'avenir qui pourra paraître pessimiste, mais qui est en réalité plus réaliste, car fondée sur une analyse détaillée et critique des possibilités de production dans l'avenir des provinces pétrolières mondiales, mais aussi des pétroles non conventionnels.

On trouvera le détail des méthodes utilisées en particulier dans les travaux de Jean Laherrère (2). Schématiquement elles sont basées sur une estimation des Ultimes de production des provinces pétrolières mondiales en construisant des courbes d'écrémage (figure 24) à partir d'une patiente collecte des réserves et des données de production des gisements. Une fois l'Ultime estimé, on utilise des fonctions logistiques pour modéliser les productions futures. Ces méthodes de modélisation ont été validées par des observations «de terrain», c'est-à-dire par la confrontation des résultats du modèle et de l'évolution observée de la production des gisements, ainsi que par des «études postmortem», c'est-à-dire la modélisation de productions passées, telles que les productions de charbon en France ou au Royaume-Uni. Les modèles n'ayant pas toujours bonne presse, on peut se demander ce que valent ceux-ci. En fait, le plus délicat est une bonne détermination de l'Ultime, qui est plus facile pour le pétrole que pour le gaz, et plus pour le gaz que pour le charbon.

On constate jusqu'à présent pour le pétrole une bonne adéquation entre les prédictions et les réalisations. C'est ainsi que Campbell et Laherrère (4) avaient par exemple prédit en 1998 par ces méthodes que le pic du pétrole brut conventionnel aurait lieu avant 2008. Or il est admis à l'heure actuelle qu'il a eu lieu en 2006, y compris par l'AIE dans son World Energy Outlook (WEO) 2010 !

Ces estimations prévoient que le pic mondial de la production pétrolière tous liquides devrait avoir lieu vers 2020, en l'absence de toute contrainte autre que géologique, crises politiques en particulier. On peut mesurer sur cette figure l'écart avec les prévisions de l'AIE faites en 2012 pour 2035 dans son scénario «New Policies»: il est d'environ 1,3 Gt, soit à peu près 27 millions de barils par jour, ou encore 2,3 fois la production 2012 de l'Arabie Saoudite !

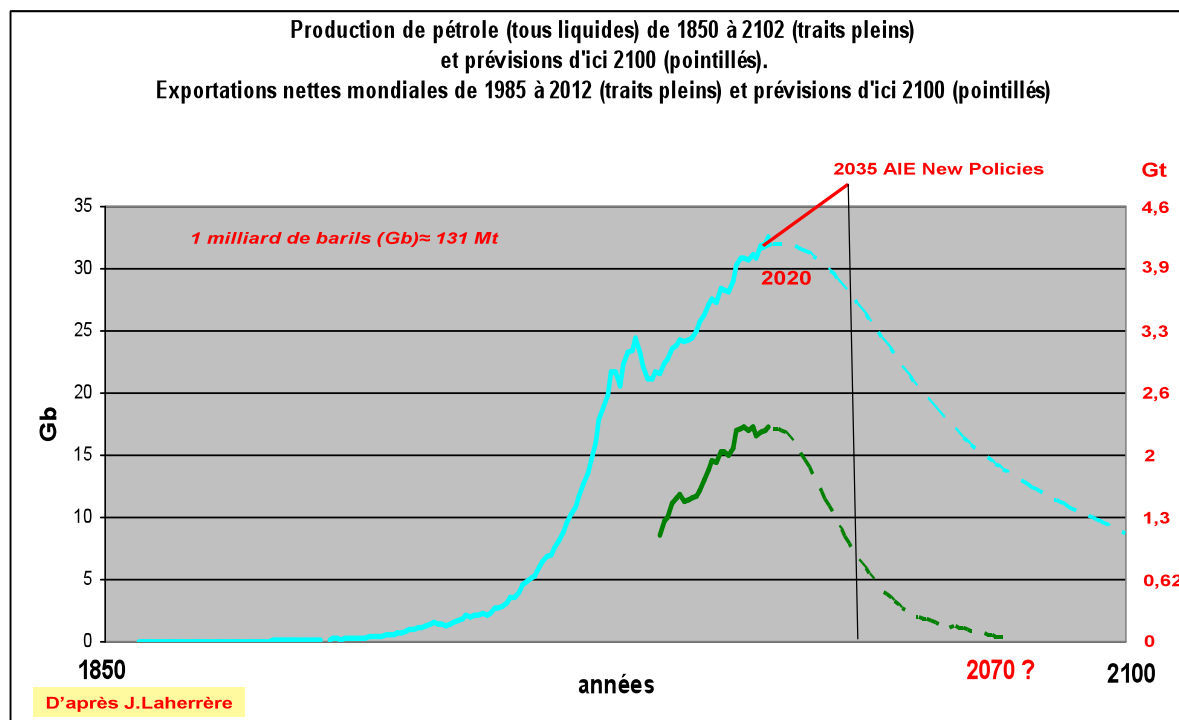


Figure 23: prévisions de l'évolution de la production de pétrole mondiale d'ici 2100, d'après les travaux de Jean Laherrère, et essai de prévision des quantités de pétrole qui pourront être mises sur le marché international.

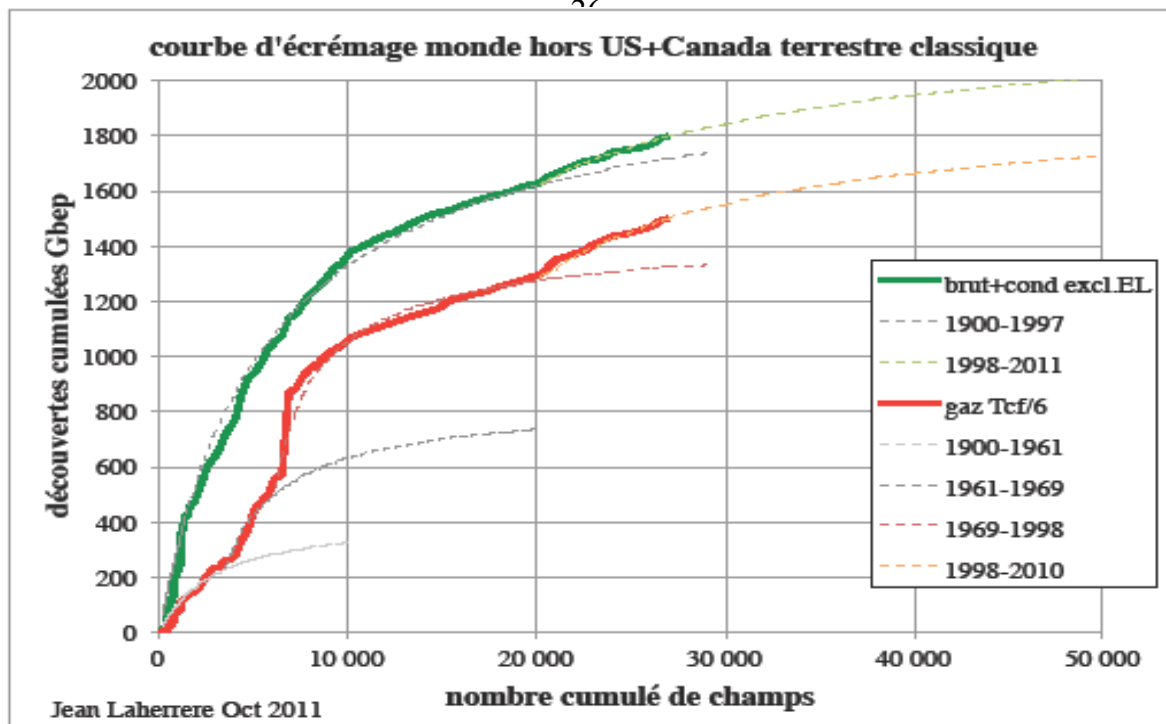


Figure 24: courbe d'écrémage pour le monde, à l'exclusion des gisements terrestres (onshore) des Etats-Unis et du Canada, et des extralourds (EL), c'est-à-dire pour l'essentiel les bitumes du Canada et les huiles extralourdes du Venezuela.

On voit également sur la figure 23 un essai de prévision des quantités de pétrole mises sur le marché mondial: elles diminueront bien plus vite que la production du fait de la consommation croissante des pays exportateurs, et pourraient être en 2035 environ trois fois plus faibles qu'actuellement, cela dans un contexte où la Chine et l'Inde auront probablement de très fortes demandes et se trouveront en compétition avec des pays sans ressources propres comme la France. De manière très surprenante, cette question n'est pratiquement pas évoquée dans les débats actuels !

Qu'est-ce qu'une courbe d'écrémage, et une fonction logistique ?

Lors de l'exploration d'un bassin pétrolifère on découvre au cours du temps des champs (des gisements) dont on estime les réserves. Pour construire la courbe dite d'écrémage, on reporte en abscisse année après année le nombre cumulé des champs découverts et en ordonnée le total des réserves ainsi découvertes.

Ces réserves pourront être réévaluées, mais il faut pour rester cohérent que ces réévaluations soient affectées au champ réévalué **à la date de sa découverte**. C'est ce qu'on appelle le «back dating».

D'autre part, il ne faut pas utiliser les estimations de réserves dites «prouvées»

(dites aussi 1P) annoncées par les compagnies ou les agences de l'énergie, qui sont entachées de nombreuses erreurs, et de biais volontaires, qui les rendent inutilisables, **mais les réserves dites 2P**

(estimation de la somme des réserves prouvées et probables) beaucoup plus fiables. Cela demande un très patient travail de collationnement, sinon même de «scouting», forme d'espionnage industriel.

Avec le temps, le nombre cumulé de champs augmente, mais leur taille moyenne diminue, et l'on observe que les réserves cumulées augmentent de moins en moins vite.

Ces courbes sont modélisées par des hyperboles dont l'asymptote donne une estimation de l'Ultime du bassin pour les cycles d'exploration successifs. Le même procédé peut être utilisé pour estimer l'Ultime à plus grande échelle et pour le monde. On trouvera dans les travaux de Jean Laherrère (par exemple dans **2**) des détails sur cette méthode, ainsi que sur d'autres méthodes utilisées pour estimer les Ultimes. Une fois l'Ultime estimé, on cale sur l'historique de production une fonction dite logistique qui est bornée par l'Ultime. La partie de la courbe ainsi construite située entre les dernières données de production et l'Ultime est donc une estimation de l'évolution dans le temps des productions futures, **hors contraintes autres que les contraintes géologiques**. Les fonctions logistiques ont été créées initialement par Verhulst (**3**) pour prédire les évolutions de population au cours du temps.

La figure 25 étend ces prévisions à l'ensemble des combustibles fossiles. Elles ne sont guère réjouissantes: le pic serait atteint en 2030 pour le gaz naturel. Pour le charbon, il s'agirait plutôt d'un plateau qui serait atteint vers 2025-2030, suivi d'un déclin vers 2070.

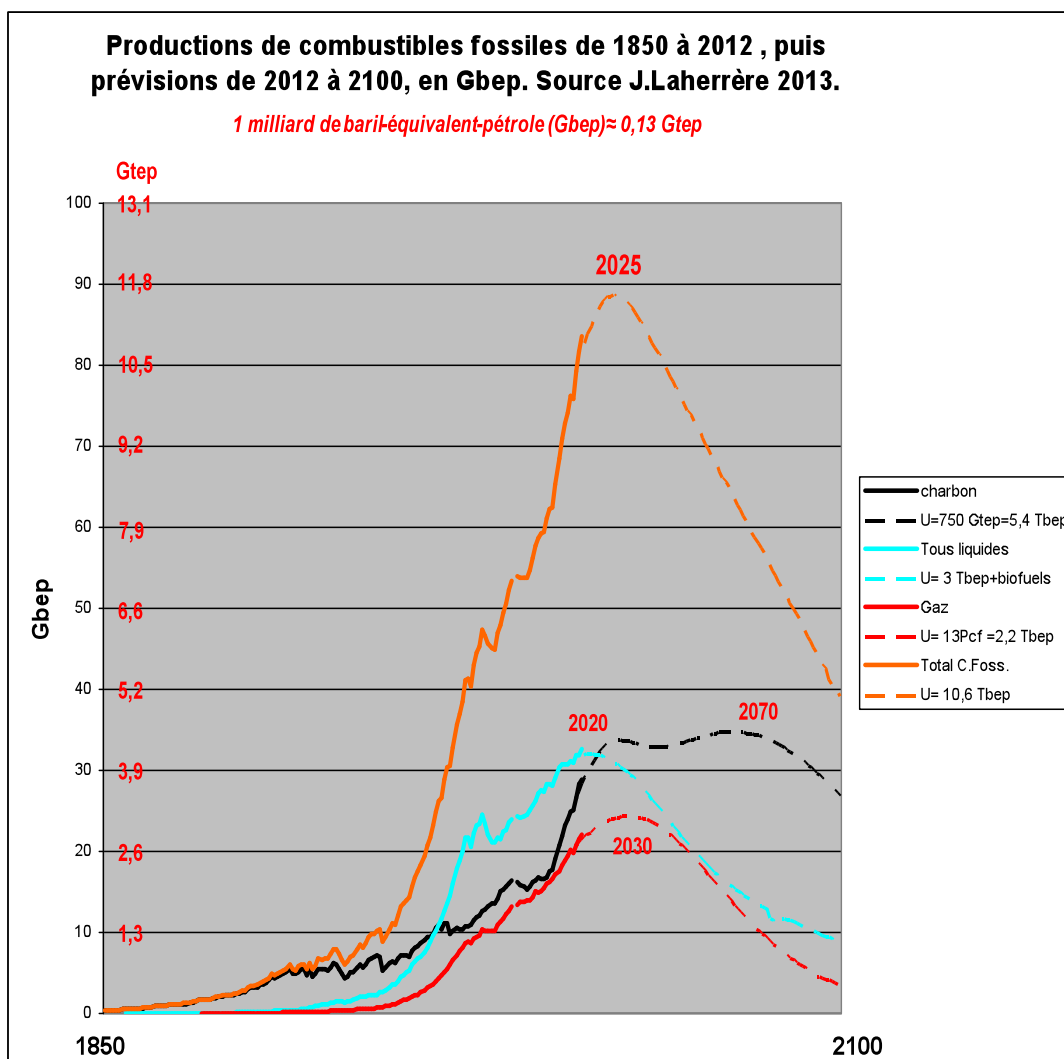


Figure 25: prévisions des productions mondiales de combustibles fossiles d'ici 2100, en l'absence de contraintes autres que géologiques. 1Gbep $\approx$ 0,13 Gtep

Les incertitudes sont toutefois plus grandes pour le gaz que pour le pétrole, et plus grandes pour le charbon que pour le gaz.

La figure 26 montre quelles seraient dans ces conditions les quantités de combustibles fossiles disponibles en moyenne pour chaque habitant de la planète, compte-tenu de l'augmentation prévisible de la population mondiale: si l'on voulait compenser après 2025 ce déclin en développant les autres sources d'énergie primaire, nucléaire ou énergies renouvelables, l'effort à faire serait gigantesque !

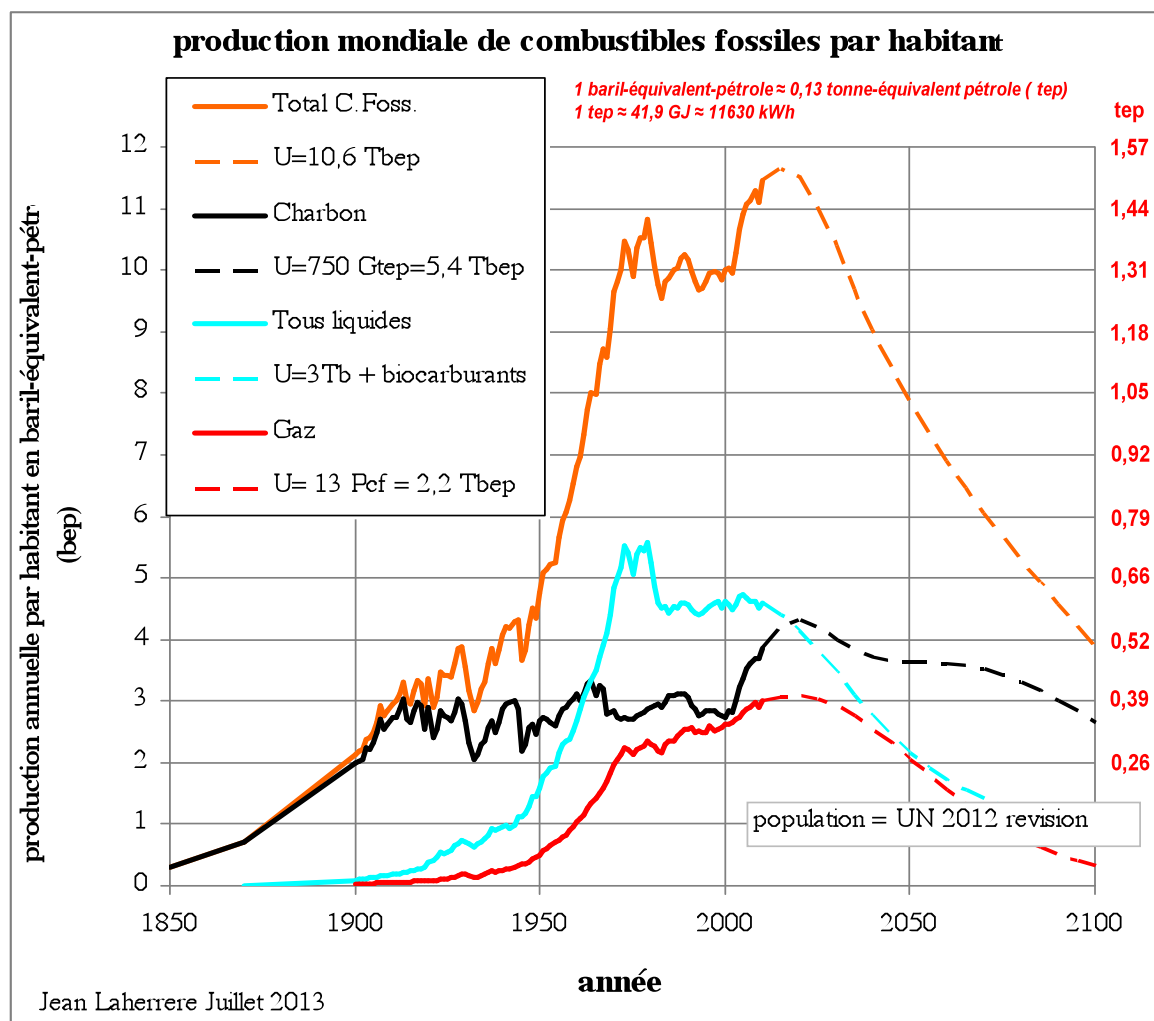


Figure 26: prévisions des productions moyennes de combustibles fossiles par habitant de la planète d'ici 2100. 1baril-équivalent-pétrole (bep) vaut environ 0,13 tonne-équivalent-pétrole (tep).

Combustibles fossiles et Climat :

On peut aisément transposer ces prévisions de l'évolution des productions mondiales en prévisions de l'évolution des émissions de gaz carbonique dues aux combustibles fossiles d'ici 2100 (figure 27). Le charbon est déjà le plus grand contributeur, mais son influence serait prépondérante après 2025.

Le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) a récemment élaboré des scénarios dits «Representative Concentration Pathways (RCP)» correspondant à 4 intensités de forçage radiatif, respectivement 2,8, 4,5, 6 et 8,6 W/m². Plus ce forçage radiatif sera élevé, et plus la température de la surface terrestre devrait être élevée à la fin de ce siècle.

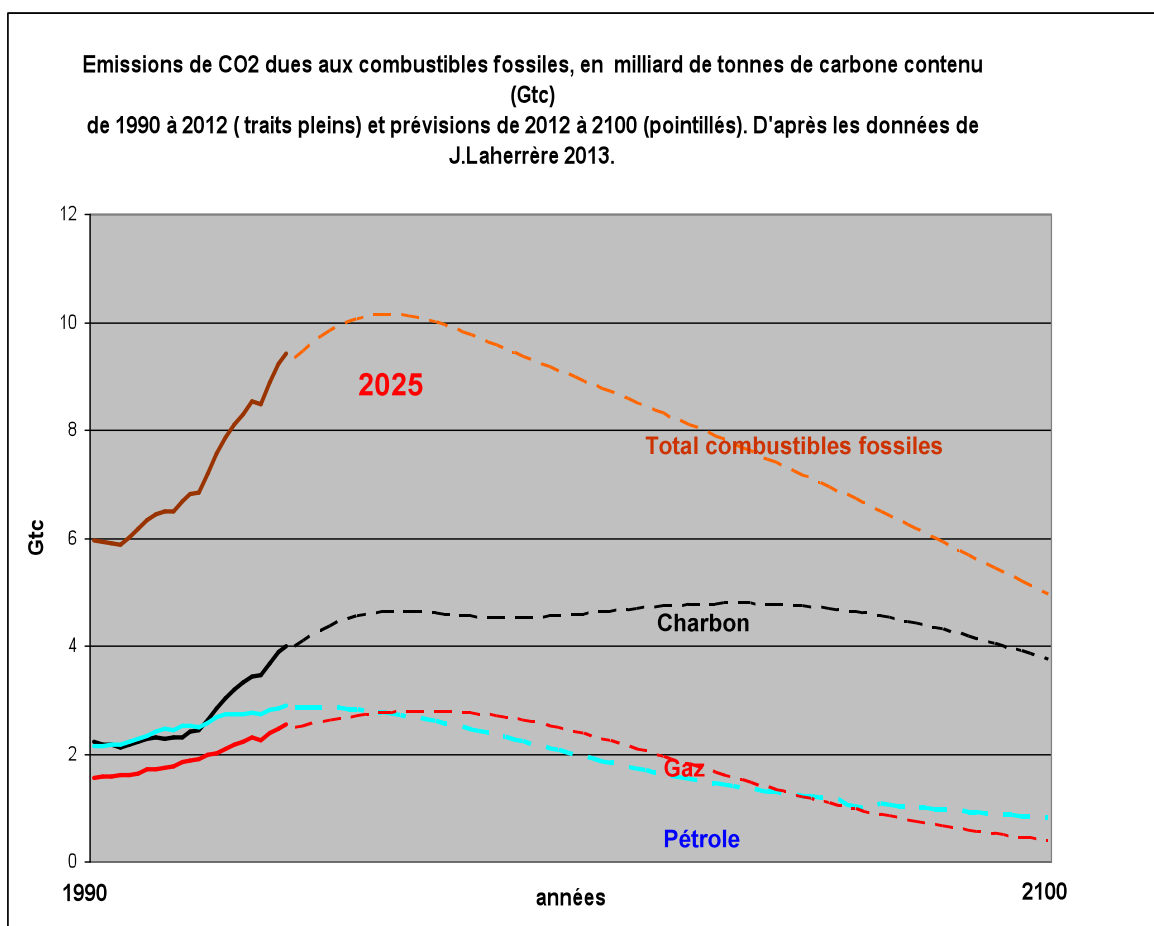


Figure 27: émissions de CO₂ calculées à partir du scénario de production des combustibles fossiles de la figure 21.

La figure 28 montre pour ces 4 RCP, quels devraient être du fait des combustibles fossiles les profils d'émissions de gaz carbonique correspondants, et les teneurs en gaz carbonique de l'atmosphère qui en résulteraient. On y a superposé (courbe verte) les émissions résultant des productions prévisibles de combustibles fossiles jusqu'en 2100.

On constate qu'elles se situent dans la partie haute des RCP jusqu'en 2025, puis dans la partie basse après 2025. Globalement, cela correspond à une situation intermédiaire entre le RCP 2,8 et le RCP 4,5, mais plus près de ce dernier. Des scénarios du type RCP 6 ou RCP 8,5 paraissent donc très improbables du seul fait des combustibles fossiles.

Il ne faut pas pour autant baisser la garde. Tout d'abord, un tel scénario correspond selon les climatologues à des teneurs en gaz carbonique de l'atmosphère en fin de siècle sensiblement supérieures aux 450 ppmv considérées comme ne devant surtout pas être dépassées. D'autre part ceci ne concerne que le gaz carbonique. Les filières de l'exploitation et de l'utilisation des combustibles fossiles émettent aussi du méthane, gaz à effet de serre beaucoup plus puissant que le gaz carbonique comme on sait. Mais ces émissions sont difficiles à quantifier à l'échelle mondiale et il n'y a pas eu jusqu'à présent beaucoup d'efforts pour y arriver.

Le charbon représente d'ores et déjà 45 % du total, et cette proportion va selon toute vraisemblance augmenter. C'est aussi le combustible fossile dont les prévisions de production pourraient être le plus révisées en hausse.

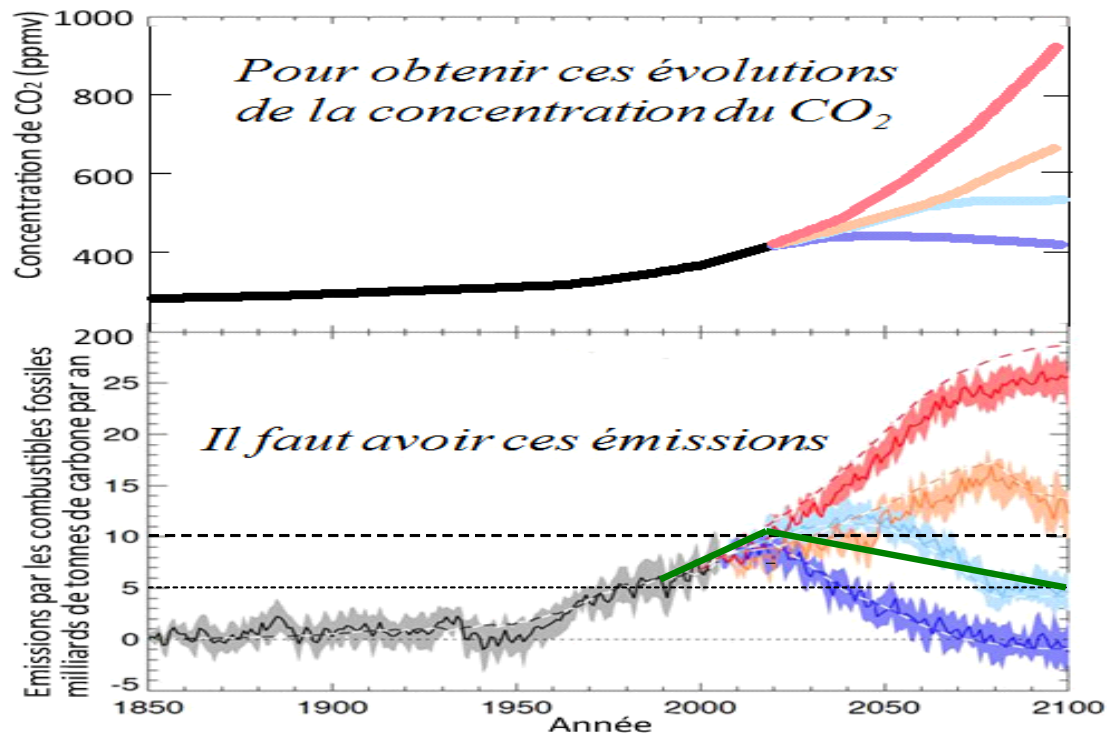


Figure 28: Quantités de CO₂ qui devraient être émises par les combustibles fossiles pour suivre les trajectoires correspondant aux 4 RCP (source GIEC) et position approximative dans ce schéma (courbe verte) des émissions prévisibles des combustibles fossiles selon la figure 27.

On ne prend pas non plus en compte ici un possible développement de l'exploitation du charbon par gazéification souterraine, ou de la production d'huile (pétrole synthétique) par pyrolyse de schistes bitumineux (STL), qui bouleverserait ces prévisions car on aurait alors accès à de bien plus grandes quantités de combustibles fossiles. Mais le coût et les inconvénients environnementaux de telles exploitations sont tels qu'il semble peu probable qu'elles se développent un jour, du moins à grande échelle.

Attention également, mais c'est un autre sujet, à l'importante mortalité attachée à la filière charbon, et en particulier, pour les populations avoisinantes, à la pollution atmosphérique par les particules fines, dont on voit les effets dévastateurs en Chine, mais qui provoquerait actuellement environ 30 000 morts prématurées par an dans la population d'Europe de l'Ouest, dont 10 000 en Allemagne (5).

Conclusion : les combustibles fossiles donneront le tempo de la transition énergétique !

La probabilité est forte que nous ne soyons plus très loin du pic mondial de production du pétrole (2020 ?), ni de celui du gaz (2030 ?), ni même d'un plafonnement de la production du charbon (2025-2030 ?)

Du fait de l'importance majeure des combustibles fossiles dans la consommation d'énergie primaire et de l'étroite relation entre consommation d'énergie et croissance économique, cela présage un fort ralentissement à venir bientôt de l'économie mondiale, ralentissement encore plus fort à l'échelle des individus, du fait de la croissance de la population mondiale.

Eviter la récession suppose de trouver très rapidement des relais dans d'autres sources d'énergie, énergie nucléaire et énergies renouvelables. Mais la tâche est immense. A défaut,

les sociétés des pays développés, les plus consommatrices, devront s'adapter en diminuant leur consommation d'énergie sans rupture sociale. Tâche immense également. Nous vivons déjà un «choc pétrolier» mou, dont la mollesse nous empêche de prendre la mesure. Il est probablement à l'origine du ralentissement de la croissance observé dans les pays développés.

Du fait des limites géologiques à la production des combustibles fossiles, les émissions anthropiques de gaz carbonique devraient rester dans la partie basse des scénarios RCP utilisés comme référence par le GIEC. Pour autant, il ne faut pas baisser la garde : ces émissions resteront préoccupantes, et la contribution du charbon, déjà la plus importante, va se renforcer. Or c'est lui dont les prévisions de production sont les plus susceptibles d'être révisées en hausse. Ces émissions seraient aussi renforcées par un fort développement de la gazéification souterraine du charbon, ou de celui du «pétrole synthétique produit à partir des «schistes bitumineux», qui donneraient accès à des ressources très importantes de combustibles fossiles non exploitables actuellement.

Attention: les quantités de combustibles fossiles disponibles sur les marchés mondiaux, en particulier pour le pétrole, diminueront plus tôt et plus vite que leurs productions !

La France, dépourvue de ressources, doit se fournir sur ces marchés. Elle est donc particulièrement exposée. Elle est aussi en compétition avec des pays ou des ensembles géopolitiques qui possèdent d'importantes ressources financières et qui peuvent tenir quelque temps en cas de crise durable d'approvisionnement. Elle a donc le plus grand intérêt à diminuer sa vulnérabilité en diminuant rapidement sa consommation de combustibles fossiles et en particulier de pétrole, pour lequel les échéances sont les plus proches. Il en est à peu près de même pour l'EU 28 et plus particulièrement pour la Zone Euro.

Bien sûr bien des choses peuvent se produire qui ne sont pas anticipées ici, entre autres, en ce qui concerne le pétrole:

- un fort développement du pétrole de roches-mères à l'échelle mondiale grâce à des avancées dans les techniques de fracturation; une forte amélioration de la récupération du pétrole brut conventionnel; la découverte inattendue de gisements géants dans des régions encore incomplètement explorées comme l'Arctique. Cela augmenterait la production, mais cela ne changerait guère la date du pic pétrolier. Ce pic serait un peu plus haut et deviendrait sans doute un plateau étalé sur une dizaine d'années. Le déclin serait aussi moins abrupt.
- un fort développement des centrales nucléaires dans les grands pays exportateurs, en particulier au Moyen-Orient, qui permettrait d'y fermer les centrales à fuel comme a fait la France après les chocs pétroliers, et de consacrer une partie plus grande de la production à l'exportation.
- un développement rapide des véhicules peu consommateurs, ou encore la substitution du pétrole par du gaz naturel ou des carburants synthétiques dans les transports, qui permettrait de s'adapter au déclin de sa production (mais précipiterait les déclin du gaz naturel et du charbon).

Mais il s'agit là d'un catalogue de paris sur l'avenir et non d'un calendrier de réalisations programmées. Il est très douteux que ces évolutions puissent se produire à une vitesse suffisante pour compenser le déclin de la production de pétrole.

Pour autant que «gouverner c'est prévoir», il paraît sage de prévoir pour la France une décroissance prochaine des quantités de combustibles fossiles dont elle pourra disposer, en premier lieu de pétrole, même si ce n'est qu'une forte probabilité et non une certitude.

Anticiper le déclin de la disponibilité des combustibles fossiles en organisant la diminution de leur consommation est une stratégie de «non-regret». Là devrait être la priorité de la «transition énergétique».

Références bibliographiques

1- D.Hugues, Février 2013: *Drill, Baby, Drill, can unconventional fuels usher in a new era of energy abundance*, Post Carbon Institute, feb.2013.

<http://www.postcarbon.org/reports/DBD-report-FINAL.pdf>

2- J.Laherrère J.H. Décembre 2011 «Energie, Nature et les hommes » Mastere OSE Ecole des Mines de Paris Sophia Antipolis, 1^{er} décembre 2011.

http://aspofrance.viabloga.com/files/JL_Sophia2011.pdf

3- PF. Verhulst, 1845 : *Recherches mathématiques sur la loi d'accroissement de la population*, Nouveaux Mémoires de l'Académie Royale des Sciences et Belles-Lettres de Bruxelles, 18, 1845, p.1-42.

4- C.Campbell and J.Laherrère , 1998: *The end of cheap oil*. *Scientific American*, March 1998.

5- B.Durand, 2011: *Les dangers du charbon*. Etude SLC, 16 Novembre 2011

<http://www.sauvonsleclimat.org/etudeshtml/les-dangers-du-charbon/35-fparticles/950-les-dangers-du-charbon.html>

A paraître à la Royal Society: Theme Issue 'The future of oil supply' organised and edited by Richard G. Miller and Steve R. Sorrell, January 13, 2014; 372 (2006)

<http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/372/2006>

A paraître chez Elsevier: *Energy Policy*, volume 64, January 2014

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421513003856>

Remerciements

Les personnes suivantes m'ont été d'une aide précieuse dans la réalisation de ce document: P.Alba, H.Andruleit, PR.Bauquis, P.Brocovens, J.Brown, M.Descamps, D.Hugues, JM.Jancovici , J.Laherrère, J.Poitou, K.van de Loo, U.Maassen, E.Mearns, J.Messner, O.Rech, D.Rutledge.

Les données utilisées ici proviennent, pour les années postérieures à 1965, pour l'essentiel de la British Petroleum Statistical Review 1951-2012. Les plus anciennes proviennent pour l'Allemagne d'instituts professionnels : BGR, DEBRIV, GVSt, et des patientes compilations d'O.Rech pour la France et de D.Rutledge pour le Royaume-Uni.