

Soumission à l'enquête publique du Parlement wallon sur les liens entre le pic pétrolier et l'économie, et les implications pour la Wallonie.

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

Bernard Durand

Décembre 2013

Résumé

Les combustibles 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 producteurs en consomment des quantités croissantes pour assurer leur développement tout en faisant face à l'accroissement de leur population. De plus la France et la Zone Euro devront 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.

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

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

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).*

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 pas 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 des dix dernières années: les pays dont l'économie a stagné ou régressé pendant cette période sont aussi ceux dont la consommation d'énergie primaire a diminué.

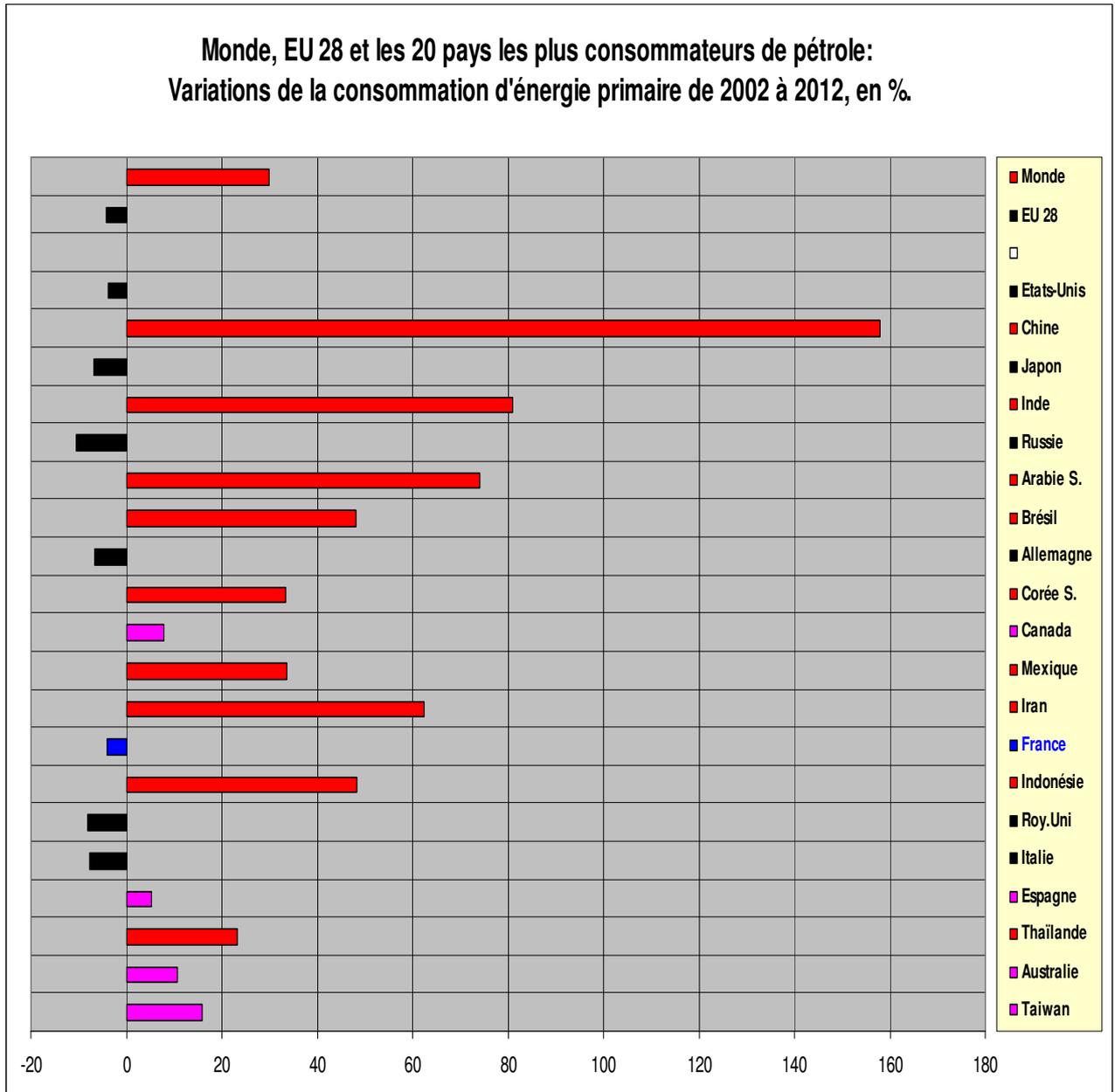


Figure 1: variation de la consommation d'énergie primaire des 20 pays les plus consommateurs de pétrole pendant la décennie 2002-2012. Les seuls pays ayant connu une forte croissance économique sont ceux dont la consommation a beaucoup augmenté (en rouge), la croissance la plus spectaculaire étant celle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

Vers le milieu du 19^{ème} siècle la consommation mondiale d'énergie primaire a commencé de 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 de leur consommation d'énergie primaire 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 ils 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.

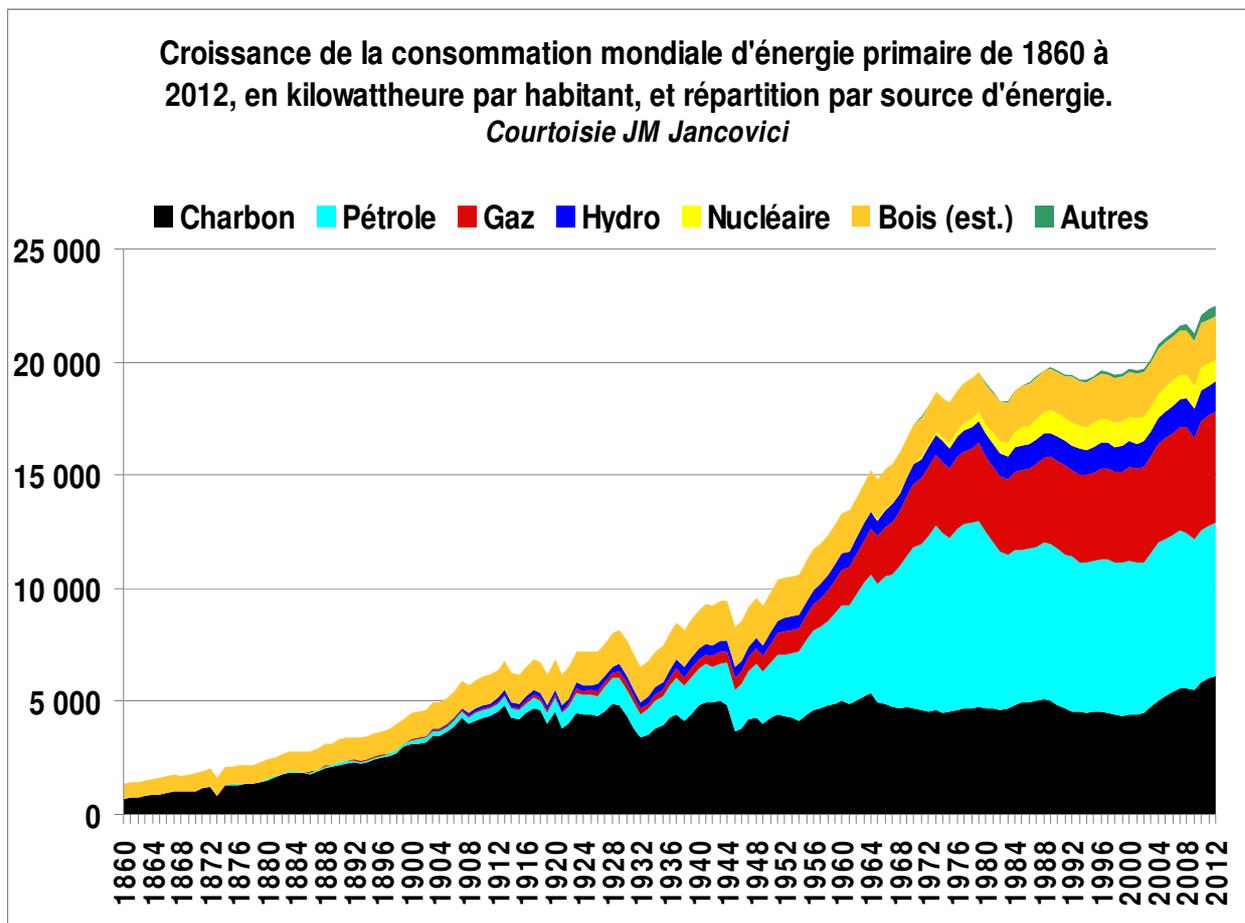


Figure 2: Croissance de la consommation moyenne d'énergie par habitant de la planète de 1860 à 2012, en kWh par habitant. Courtoisie JM Jancovici.

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.

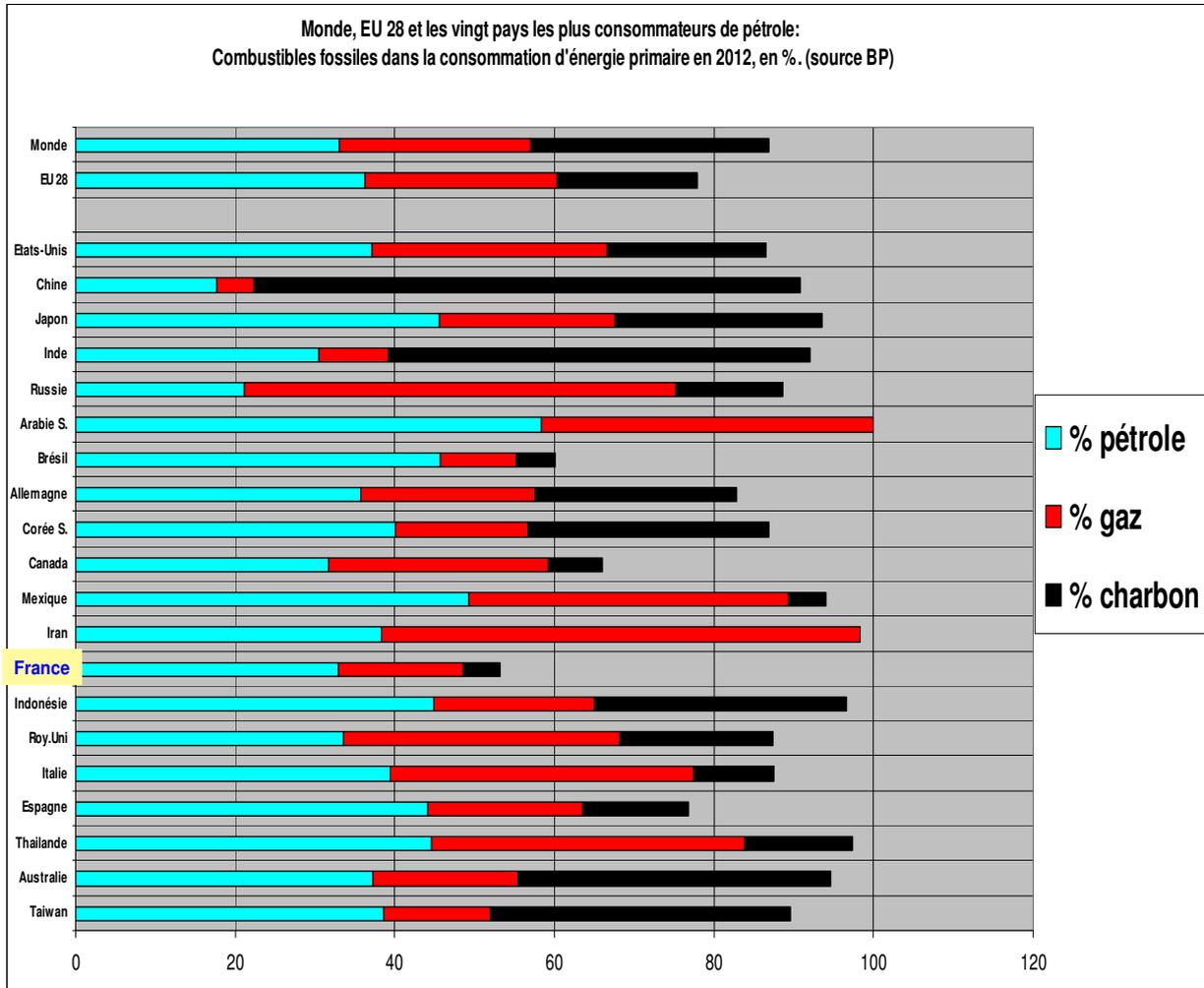


Figure 3: proportions des combustibles fossiles dans la consommation d'énergie primaire des 20 pays les plus consommateurs de pétrole. Ces données proviennent de la BP qui ne prend pas en compte la biomasse traditionnelle (bois de chauffage...). Sa prise en compte ramènerait la proportion moyenne à environ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

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.

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, 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 récupérables, 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 progrès de productivité grâce à ceux de la technologie, mais elle se précise au fur et à mesure de l'exploitation, et nous verrons qu'il existe des méthodes pour la prévoir de façon approchée quand l'exploitation est déjà bien avancée.

L'histoire du gaz et du 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 réellement exploité qu'à partir de 1740. Cependant il s'agissait de petites quantités, même si la France fut alors, en y ajoutant l'huile obtenue par pyrolyse des Schistes d'Autun, le premier producteur de pétrole de l'époque, jusqu'au développement de la production américaine après 1850.

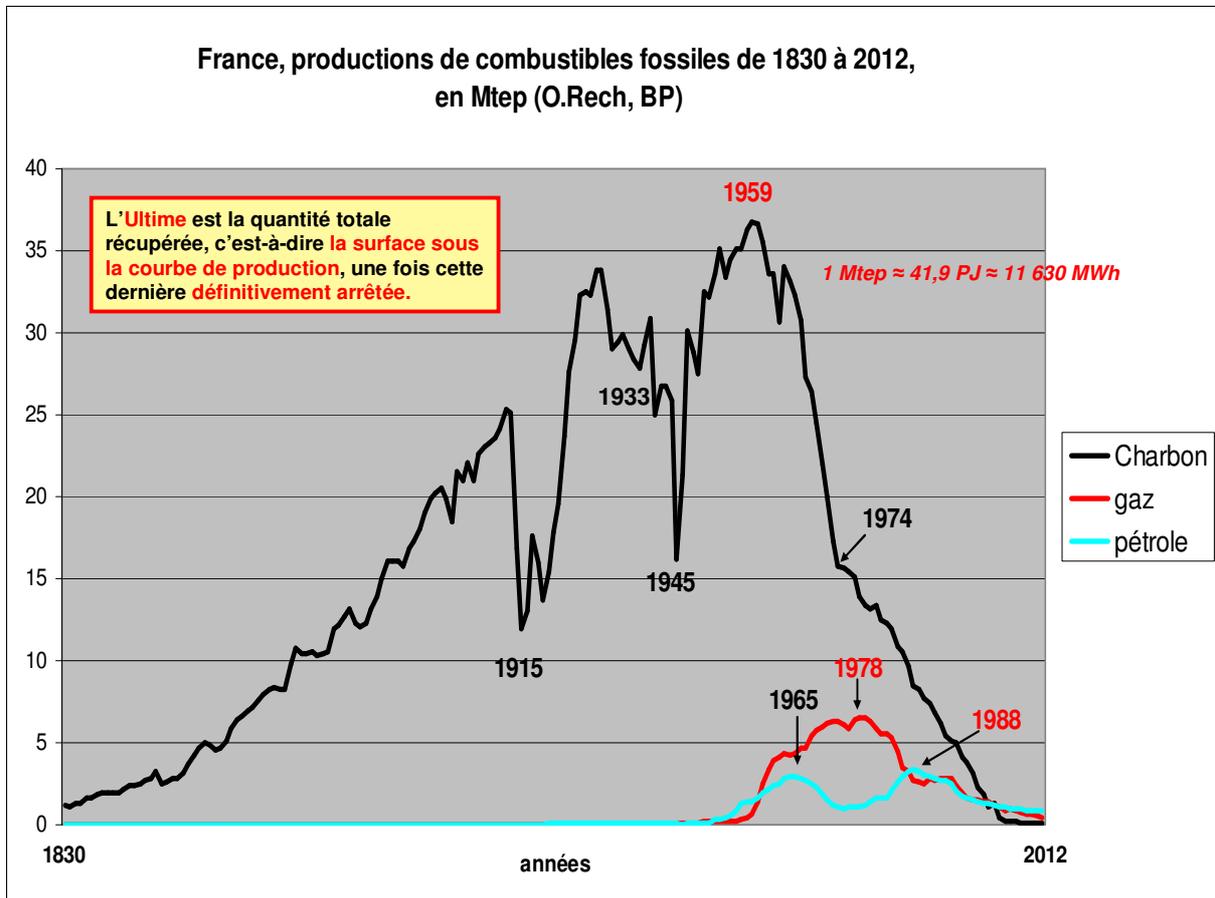


Figure 4: productions de charbon, de gaz naturel et de pétrole en France de 1830 à 2012, ramenées à la même unité de contenu énergétique (million de tonne-équivalent-pétrole, Mtep).

Elle a cru notablement, tout en restant modeste, 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 découvertes 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 sédimentaires qui leur ont donné naissance, et partiellement récupérables par fracturation hydraulique. 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.

En ce qui concerne le charbon, il existe encore des possibilités: en particulier un assez gros gisement 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, même si l'on voulait en extraire les dernières miettes de charbon parce qu'il se vendrait alors au prix de l'or.

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

Le Royaume-Uni a été le berceau de la Révolution Industrielle à la fin du 18ème 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.

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.

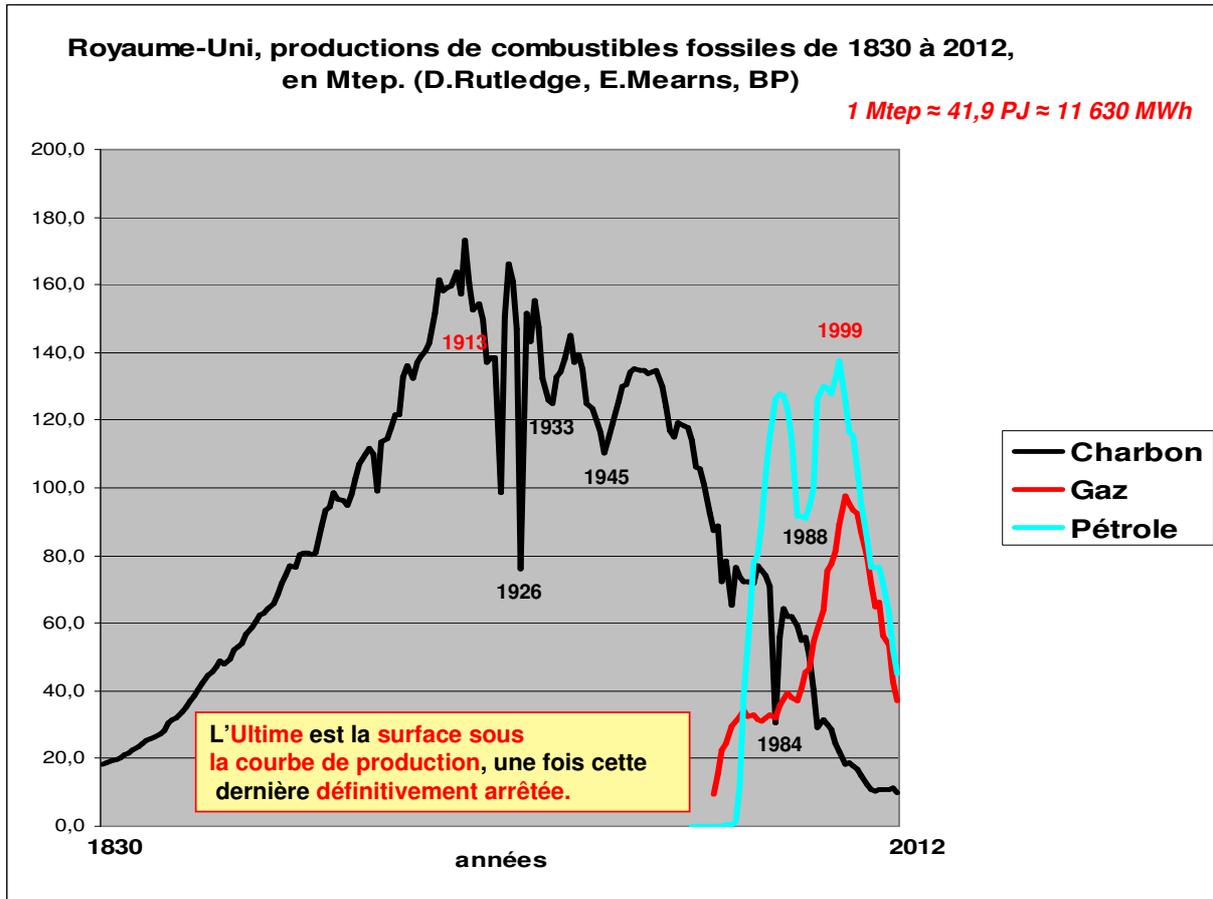


Figure 5 : productions de charbon, de gaz et de pétrole au Royaume-Uni de 1830 à 2012, ramenées à la même unité de contenu énergétique (million de tonne-équivalent-pétrole, Mtep).

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

Comme la France et le Royaume-Uni, l'Allemagne possède du charbon de bon contenu énergétique (hard coal, environ 0,7 tep par tonne) exploitables par mines souterraines. Elle possède de plus d'importants gisements de lignite (brown coal), charbon de faible contenu énergétique (environ 0,25 tep par tonne), exploitables à ciel ouvert («découvertes»). Ce lignite est produit à bas coût et sert essentiellement à produire de l'électricité. La production de charbon 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.

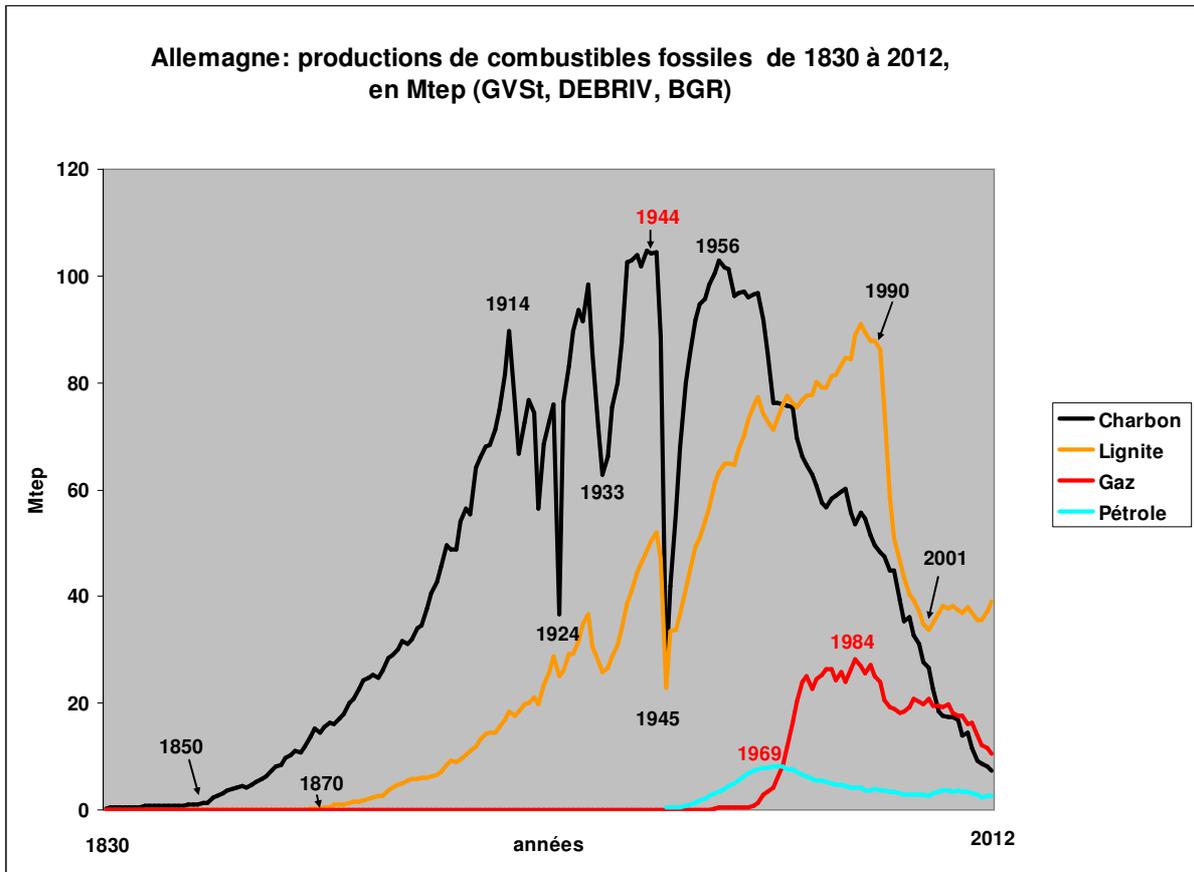


Figure 6: productions de charbon, de lignite, de gaz et de pétrole en Allemagne de 1830 à 2012, en Mtep.

La production de lignite a démarré en 1870 et à 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 jusqu'en 2001, 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.

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 une petite production de gisements situés en 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 nouvelles ressources: 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 à l'économie américaine. Toutefois il semble bien que cela soit provisoire car cette production pourrait atteindre son pic d'ici moins de dix ans (voir à ce sujet l'analyse de D.Hugues 2013 ¹).

Les Etats-Unis ne retrouveront donc sans doute pas le niveau de production pétrolière du pic de 1970 mais l'Ultime du pétrole y est encore loin d'être atteint.

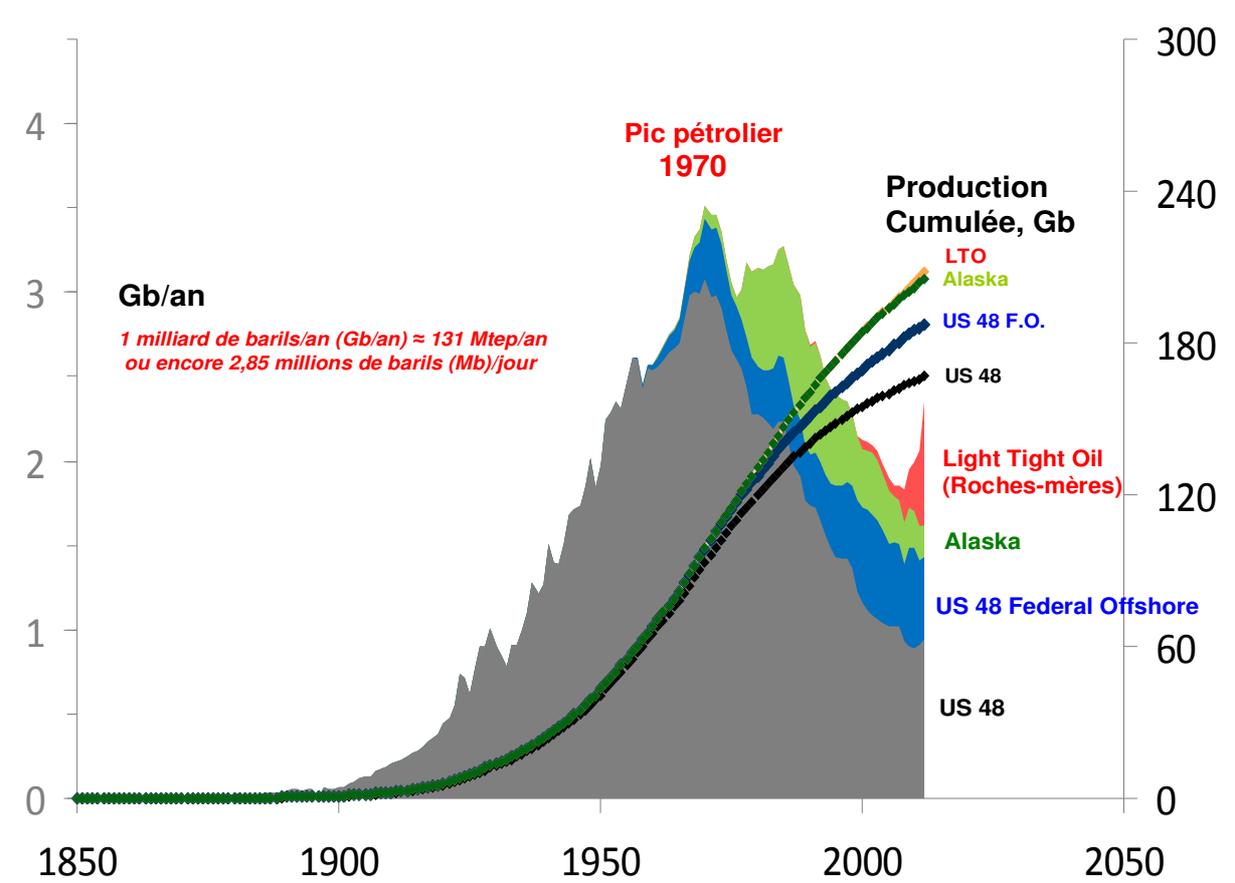


Figure 7: Production de pétrole des Etats-Unis de 1850 à 2011, en milliards de barils (Gb). Le baril est l'unité la plus utilisée dans le monde pétrolier pour mesurer les quantités de pétrole. Il s'agit d'une unité de volume, qui vaut 159 litres. Courtoisie P.Brocorens.

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

Comme les Etats-Unis, le Canada est 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.

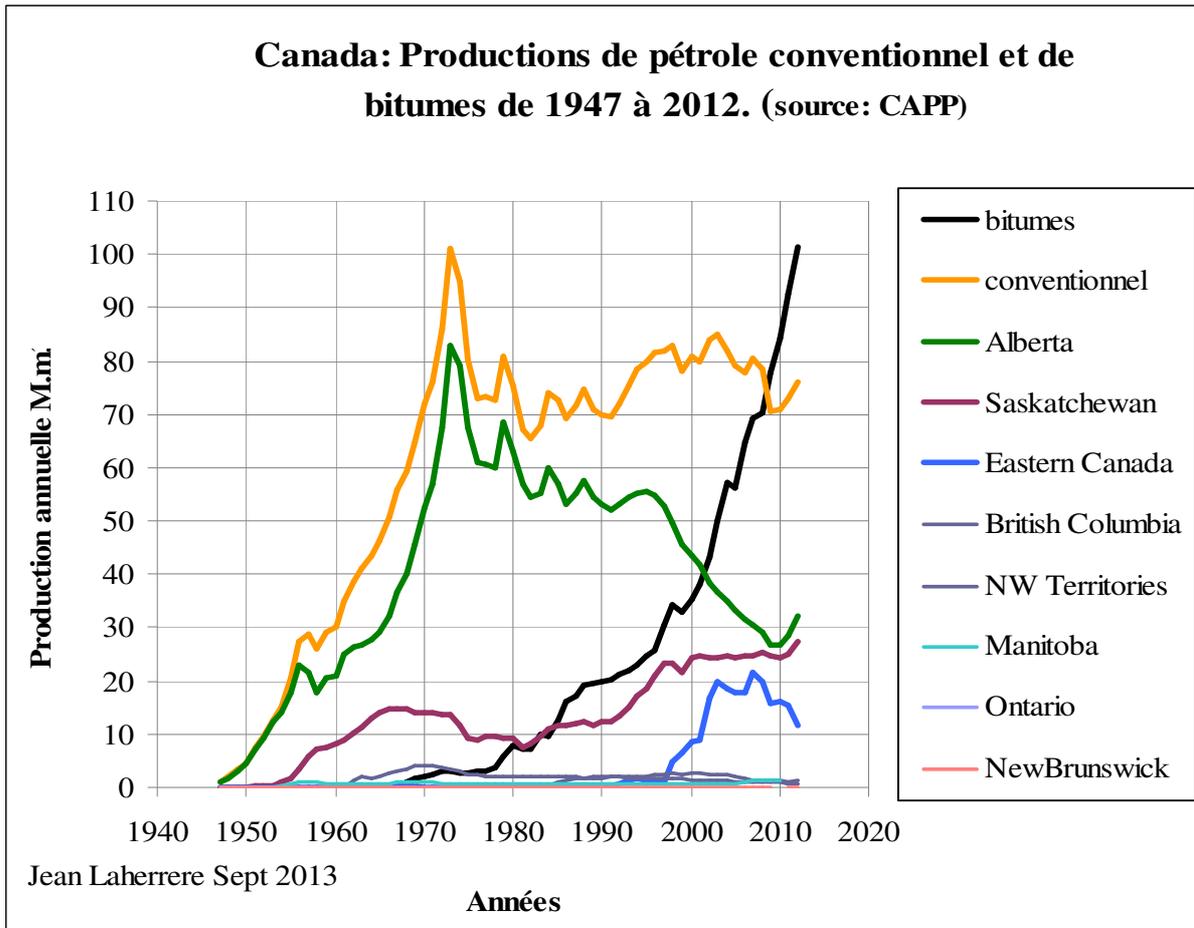


Figure 8: Histoire de la production de pétrole au Canada de 1947 à 2012. Les productions sont ici mesurées en millions de m^3 ($M.m^3$).

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. Les quantités en place sont énormes. Elles ont été répertoriées depuis fort longtemps mais leur exploitation est difficile. 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.

Ces pétroles très lourds sont appelés huiles extralourdes ou extralourds (EL, extra heavy oils ou 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).

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.

Bitumes 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. La troisième catégorie de pétrole non conventionnel est le pétrole léger que l'on extrait des gisements de gaz, appelé liquides de gaz naturels (LGN, natural gas liquids, NGL, en Anglais).

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.

L'ensemble pétrole conventionnel plus pétrole non conventionnel, auquel on ajoute souvent les biocarburants (biofuels), bien qu'ils n'aient rien à voir avec le pétrole sinon qu'ils peuvent s'y substituer dans ses utilisations, est appelé pétrole tous liquides.

On y ajoute aussi parfois ce qu'on appelle les «gains» de raffinerie, qui ne correspondent pas 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 pourtant une perte d'énergie car la raffinerie consomme de l'énergie.

- 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.

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.

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. 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.*

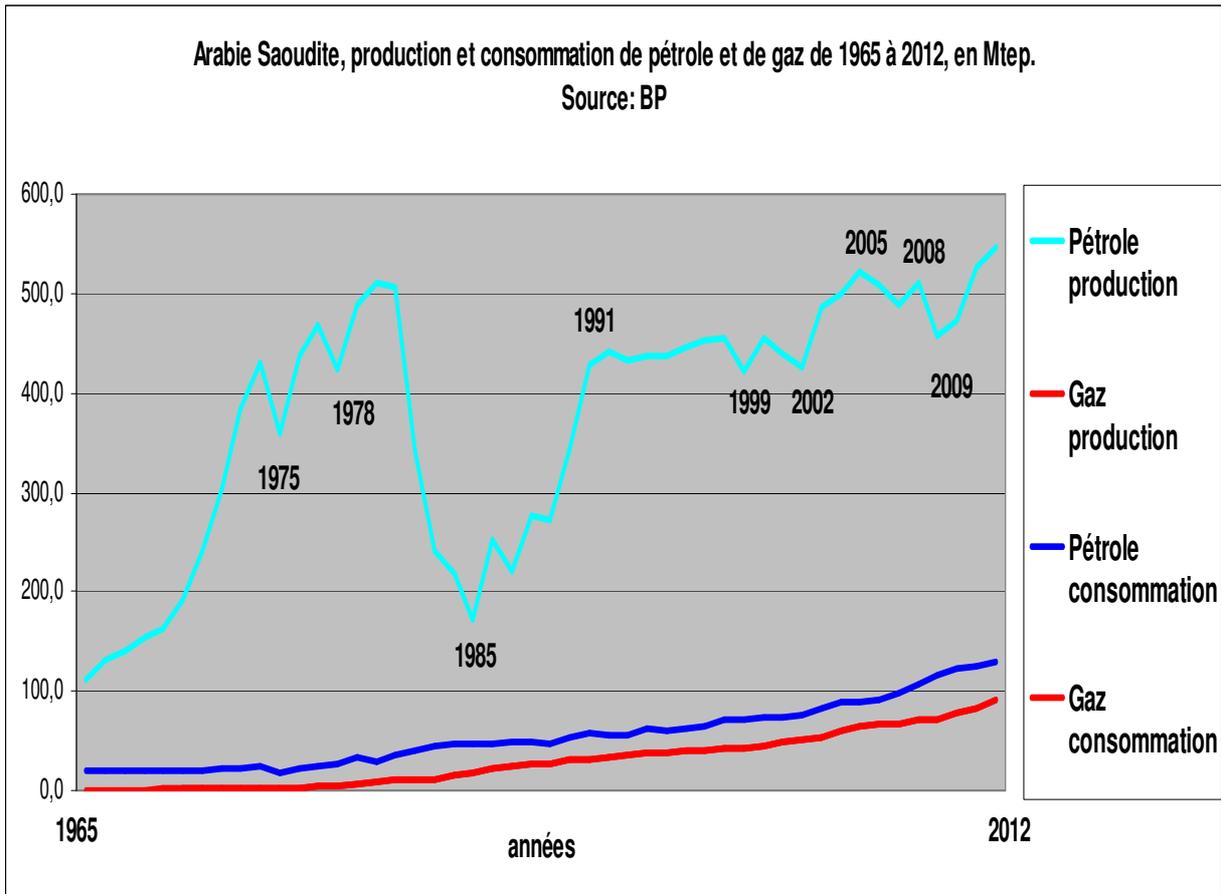


Figure 9: production de pétrole et de gaz naturel de l'Arabie Saoudite de 1965 à 2012.

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

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

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 appuyerons pour cela sur l'examen de l'évolution dans ce domaine depuis 1981, des trois ensembles les plus consommateurs d'énergie de la planète : Les Etats-Unis, la Chine et l'EU 28, à laquelle nous agglomérerons la Norvège, producteur le plus important de pétrole et de gaz en Europe. Ces ensembles consomment à eux trois environ 60 % de la production mondiale de combustibles fossiles. Nous examinerons également le cas de la France.

Nous examinerons plus particulièrement l'évolution à l'échelle mondiale de la production de pétrole, principal moteur 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 du choc pétrolier de 1979, la consommation d'énergie primaire a augmenté d'un bon tiers aux Etats-Unis, et cela jusqu'en 2007, début de la Crise 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 toujours les premiers consommateurs mondiaux. Notons à ce propos que les taxes sur les carburants étant faibles aux Etats-Unis, les consommateurs y réagissent fortement aux augmentations du prix du pétrole 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.

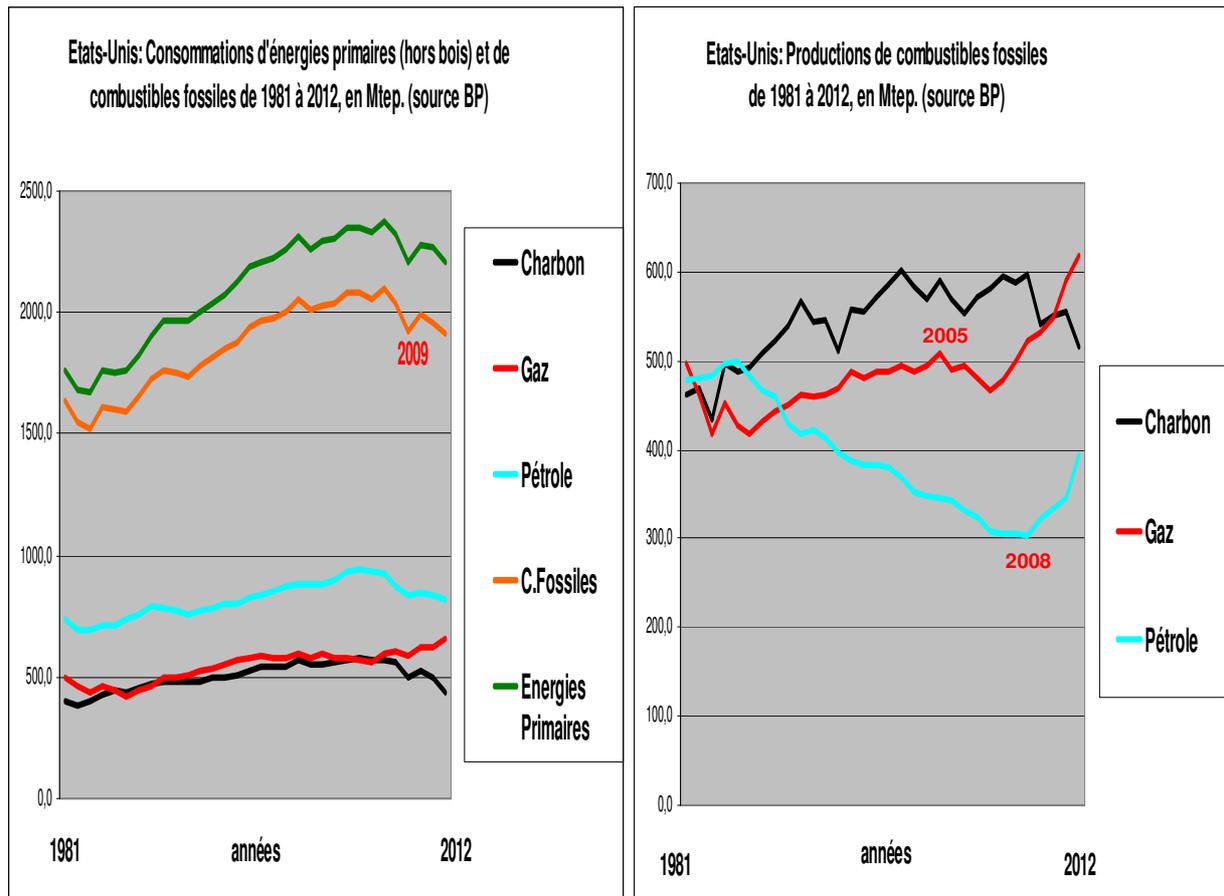


Figure 10: consommation et production de combustibles fossiles aux Etats-Unis de 1981 à 2012.

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, et plus généralement sur l'économie, des Etats-Unis.

Le coût actuel du gaz de roches-mères est actuellement très bas aux Etats-Unis, ce qui en encourage la consommation. 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, en particulier en Europe. Paradoxalement l'Europe et en particulier l'Allemagne qui ferme ses centrales nucléaires, produit de plus en plus d'électricité à partir de charbon américain ! Ce phénomène pourrait cependant être provisoire, les productions

de gaz et de pétrole de roches-mères semblant devoir connaître leur pic dans moins d'une dizaine d'années (voir à ce sujet l'analyse de D.Hugues ²).

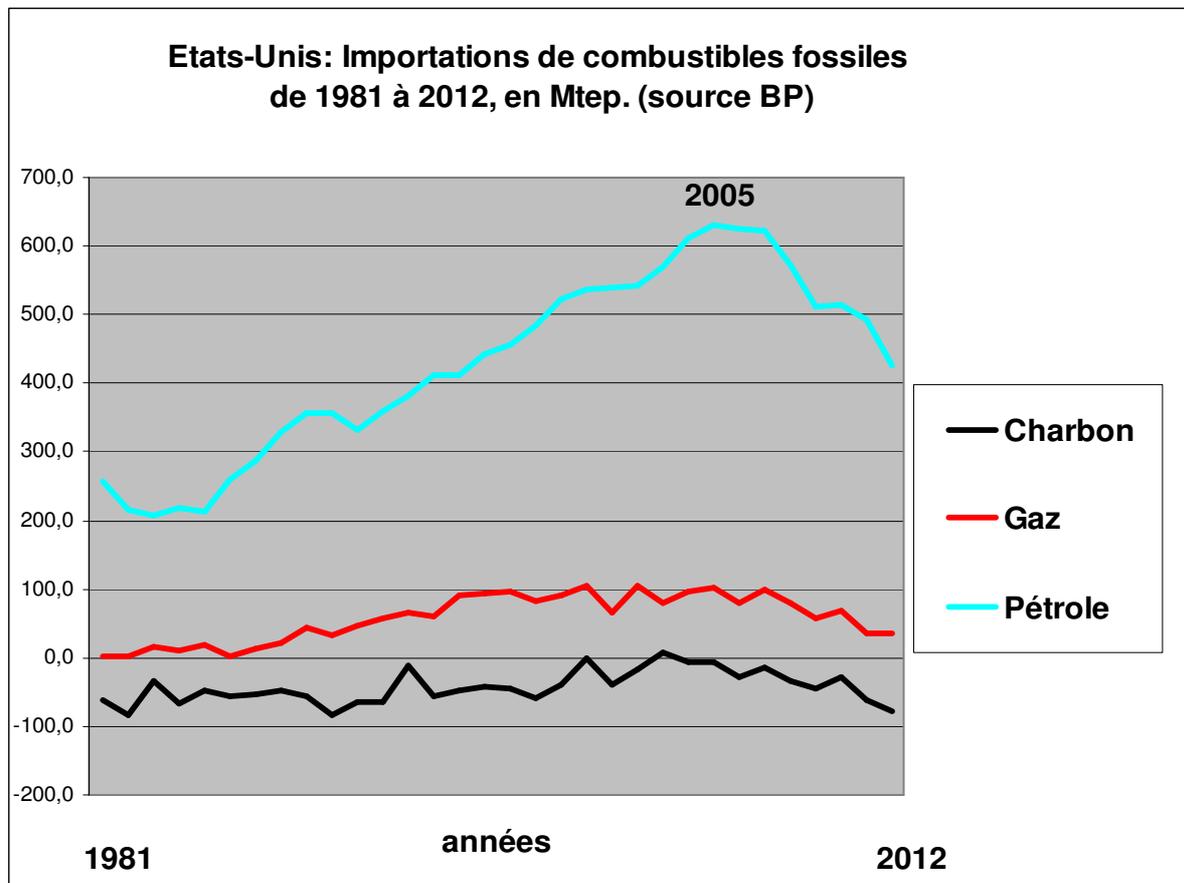


Figure 11: Etats-Unis, importations-exportations de combustibles fossiles de 1981 à 2012.

- 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. Le pétrole a toutefois connu une croissance exponentielle, en corrélation avec l'entrée de la Chine dans la civilisation de l'automobile. La consommation de gaz n'a commencé à croître qu'à la fin des années 90 et reste modérée.

Côté production, les productions de charbon et de gaz ont à peu près suivi la consommation. Par contre la production de pétrole s'essouffle.

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

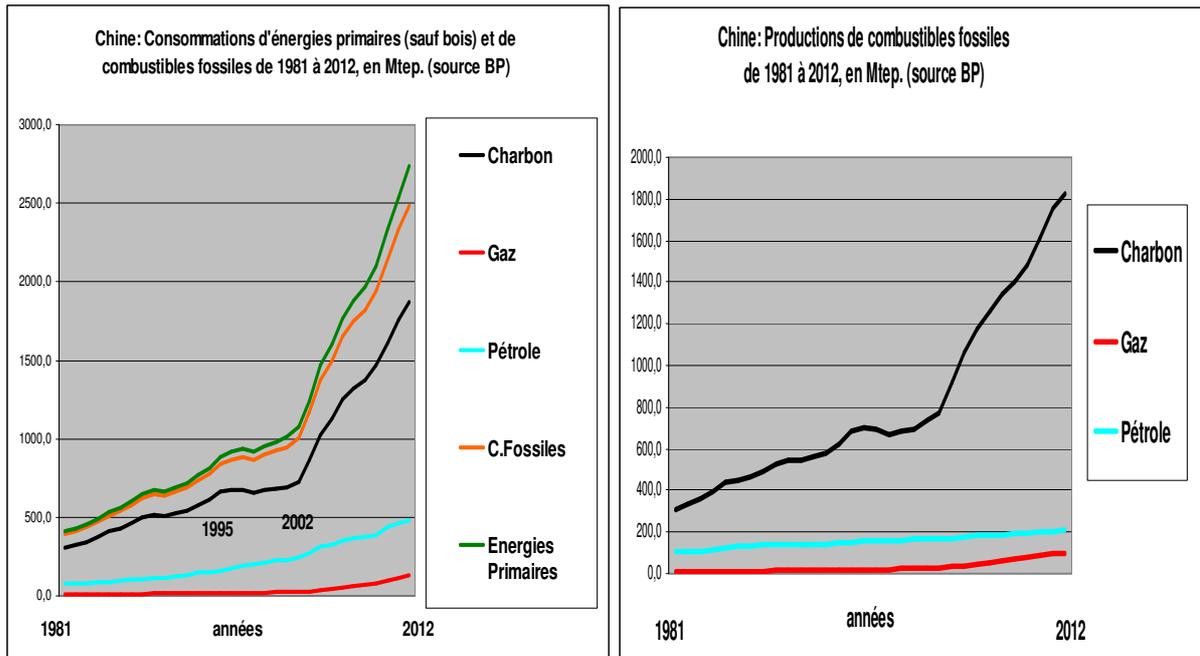


Figure 12: Chine : consommation et production de combustibles fossiles de 1981 à 2012.

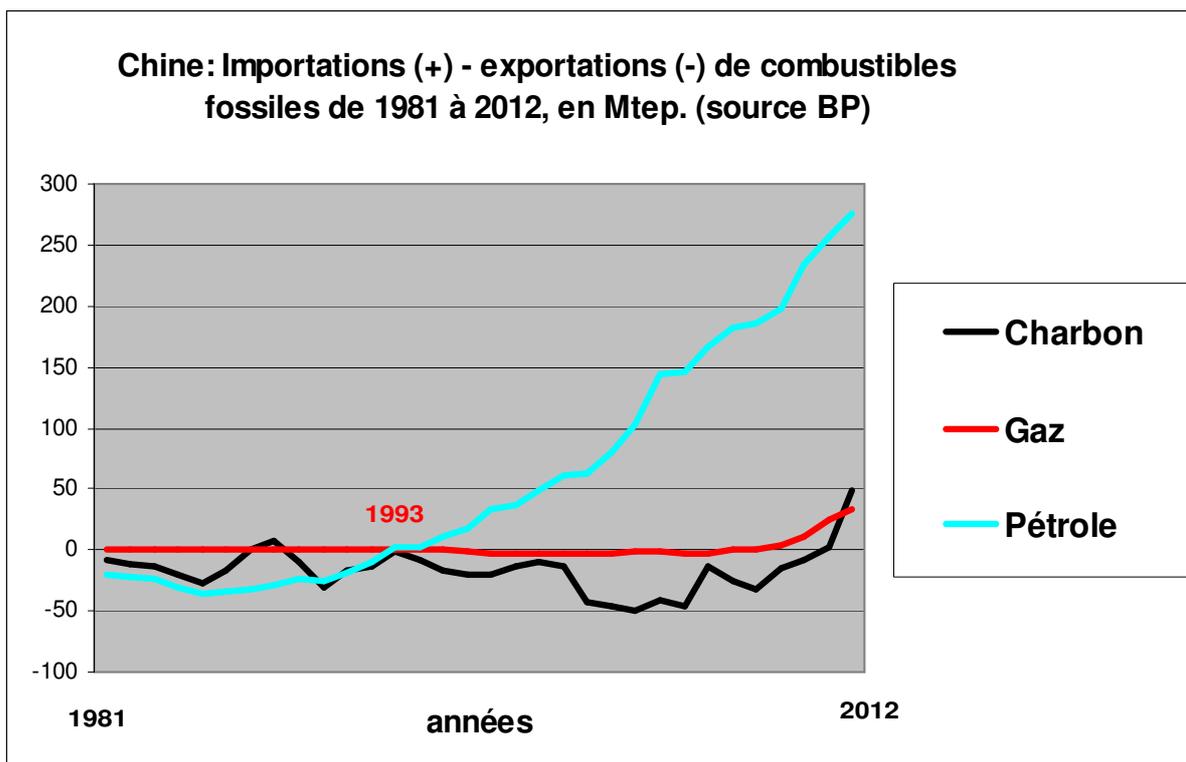


Figure 13 : Chine : Importations et Exportations de combustibles fossiles de 1981 à 2012.

*Et elle est depuis peu importatrice de charbon et de gaz.
La Chine est donc de plus en plus dépendante des marchés internationaux, en particulier pour le pétrole.*

- *L'EU28 + la Norvège (figures 14 et 15)*

Des cas examinés, 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 riche en énergie hydraulique, elle n'est que de 32 %, du fait essentiellement de sa consommation de pétrole.

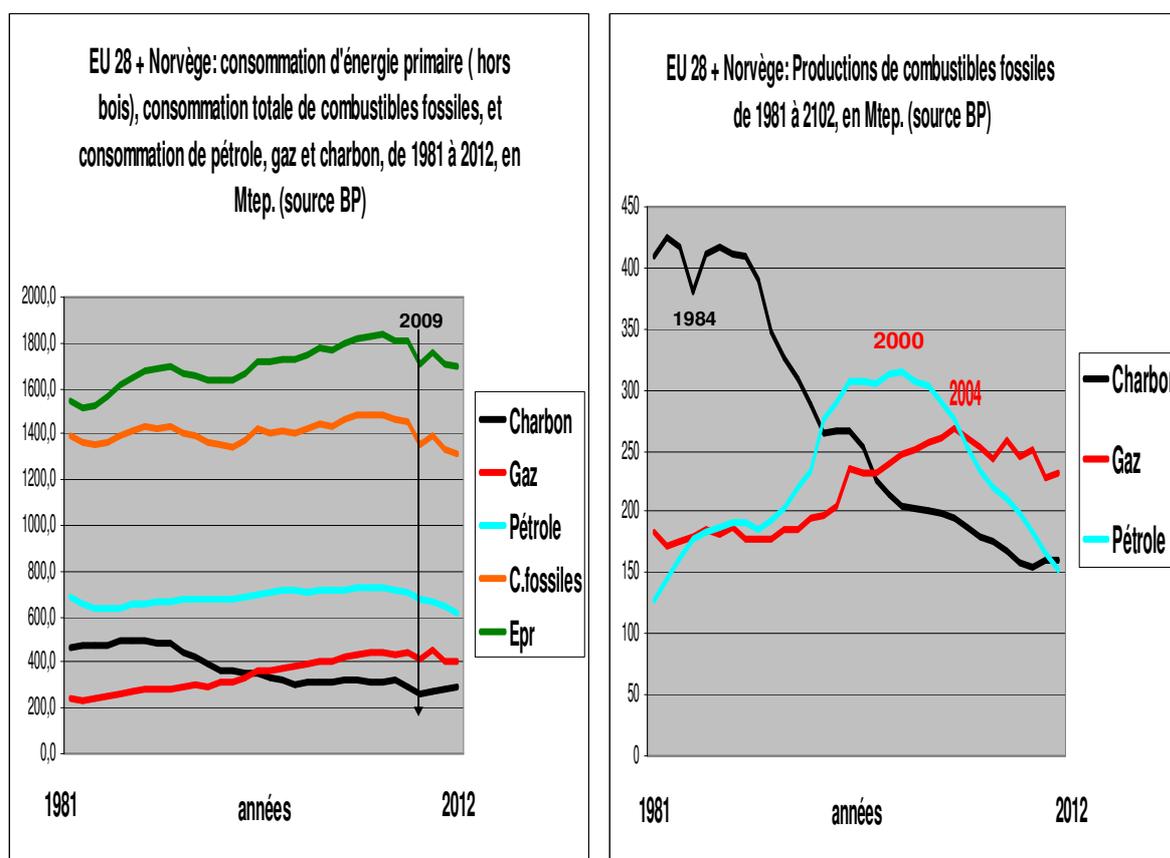


Figure 14: EU28 + Norvège : consommation et production de combustibles fossiles de 1981 à 2102.

La consommation de combustibles fossiles, à peu près stable depuis 1981, a sensiblement décliné à partir de 2007. 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 charbon et lignite, qui avait beaucoup diminué suite à la réunification allemande, a également stagné. Elle augmente à nouveau depuis 2009.

Les productions ont connu des évolutions contrastées. Dans celle de charbon, 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, puis décline 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 et de gaz n'ont donc pas d'avenir en Europe, hormis d'hypothétiques pétrole et gaz de roches-mères. En ce qui concerne le charbon, son avenir est limité pour le «hard coal» extrait des mines souterraines. Mais la production de lignite (brown coal) à ciel ouvert est en augmentation.

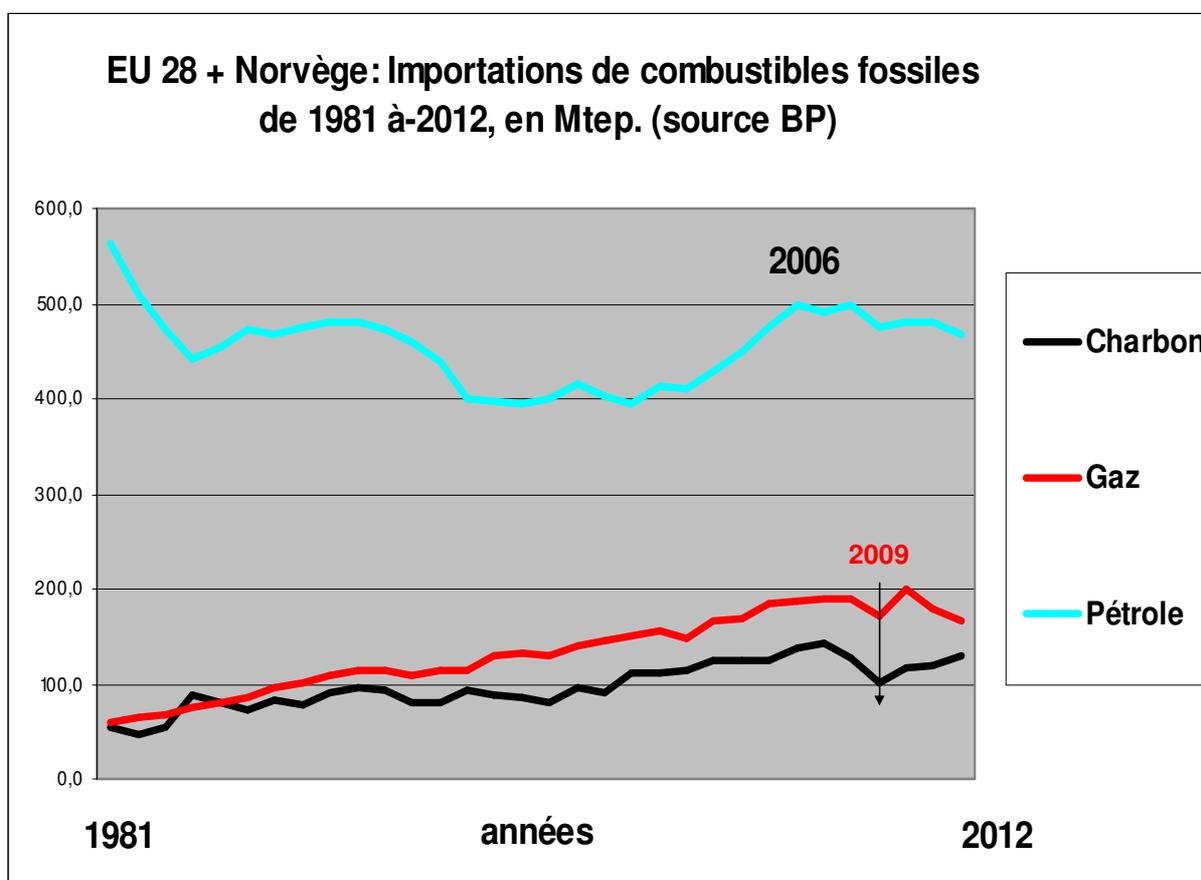


Figure 15 : importations de combustibles fossiles en EU 28 + Norvège de 1981 à 2012

Le bilan (figure 15) est inquiétant: les importations de charbon et de pétrole 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, comme expliqué plus haut.

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.

- La France (figures 16 et 17)

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 (figure 16). 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 plus probablement due à la crise économique et au prix du pétrole qu'à des actions volontaristes. 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.

Au bilan (figure 17), la France importe pratiquement tout ce qu'elle consomme. Elle dépend donc presque exclusivement des marchés internationaux, et sa facture énergétique est préoccupante. 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 plus élevée sur l'essence que sur le gazole, ce qui augmente le manque à gagner de l'Etat.

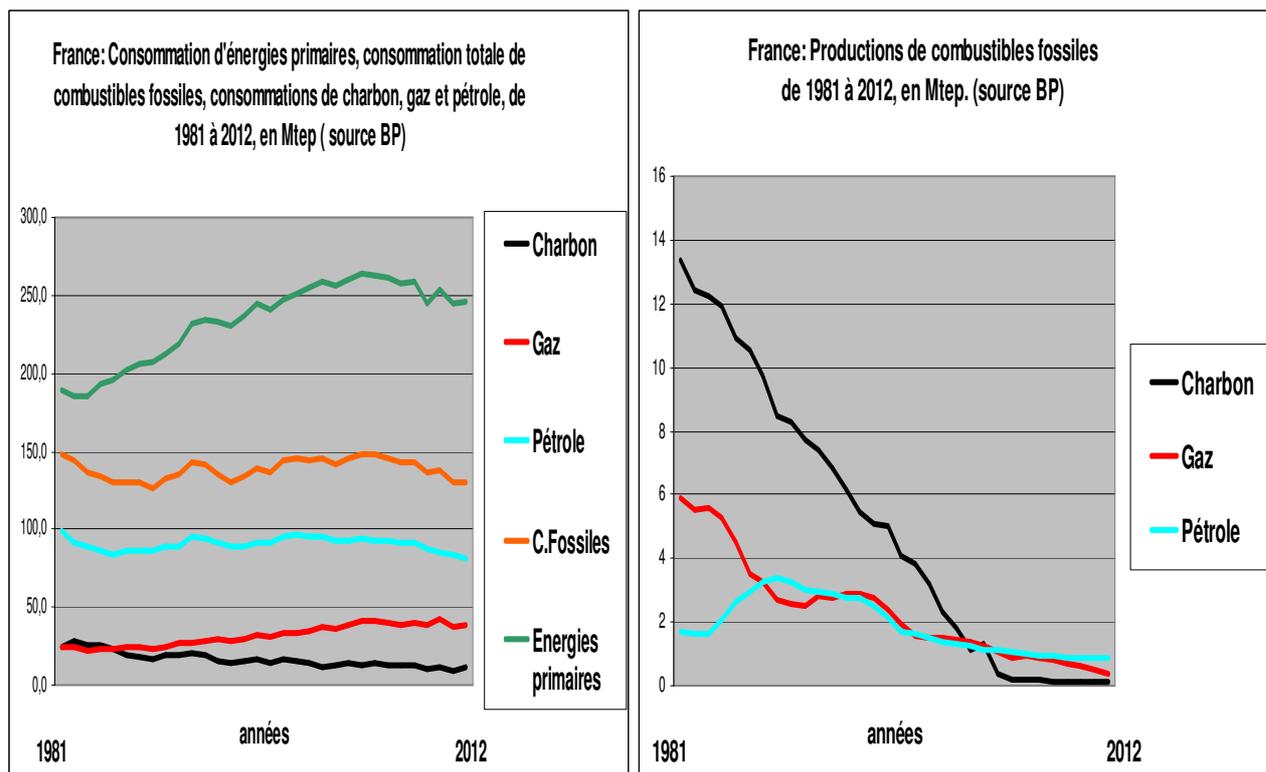


Figure 16 : consommations et productions de combustibles fossiles en France de 1981 à 2012.

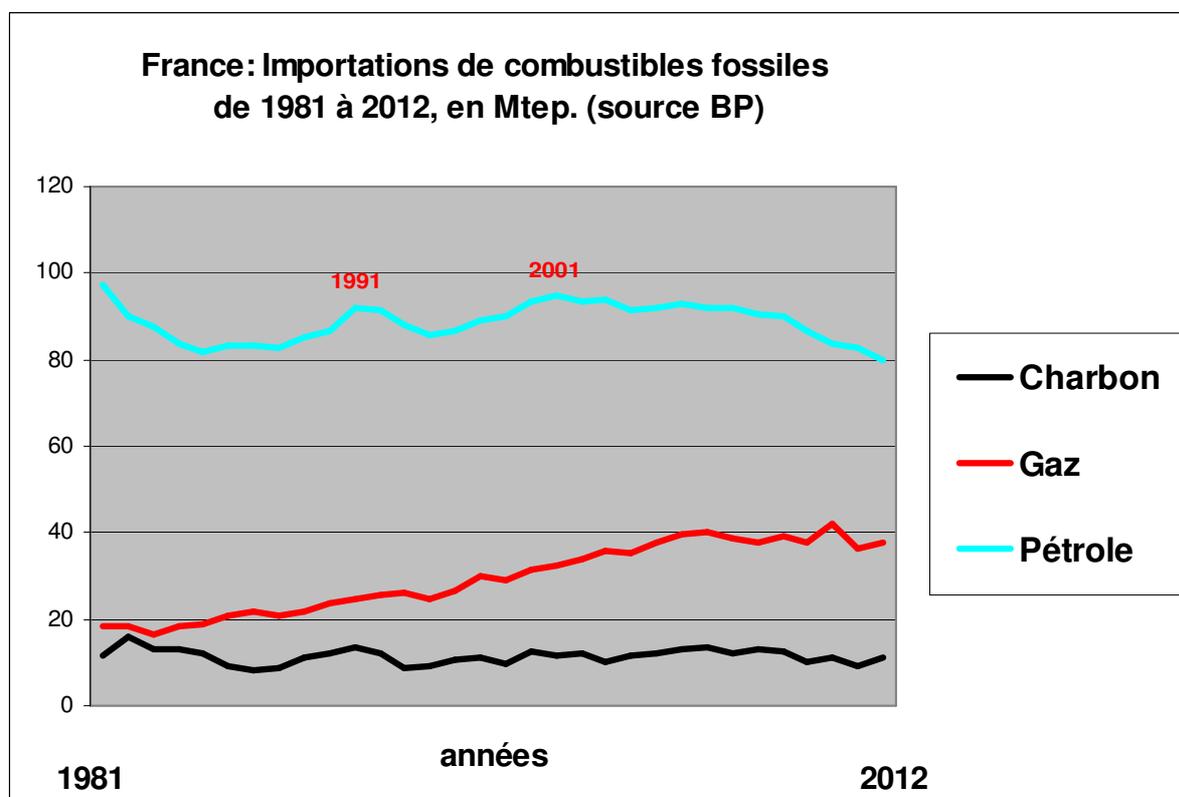


Figure 17: France : Importations de combustibles fossiles de 1981 à 2012

- *Le bilan de la production et des importations et exportations de pétrole à l'échelle mondiale (figure 18) :*

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 pétrole non conventionnel, bitumes du Canada, pétrole de roches-mères des Etats-Unis, et liquides de gaz naturel (LGN) dont la production a augmenté corrélativement à l'augmentation de la production de gaz.

La production de pétrole conventionnel est quant à elle 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.

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 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, pressés d'entrer dans la civilisation de l'automobile.*

Bien entendu, le pire n'est pas toujours sûr: un développement de l'énergie nucléaire dans les pays du Golfe permettrait à ceux-ci de diminuer leur consommation intérieure en remplaçant leurs centrales à fuel par des centrales nucléaires, leur permettant ainsi de maintenir leurs exportations. Une diminution de la consommation unitaire des véhicules à moteur thermique à l'échelle mondiale permettrait de beaucoup diminuer les importations des grands pays importateurs. Un fort développement du pétrole de roches-mères à l'échelle mondiale permettrait d'augmenter la

production. Mais il est fort peu probable que de semblables évolutions, si même elles se produisent, puissent avoir lieu à une vitesse suffisante pour éviter une crise pétrolière à terme relativement bref.

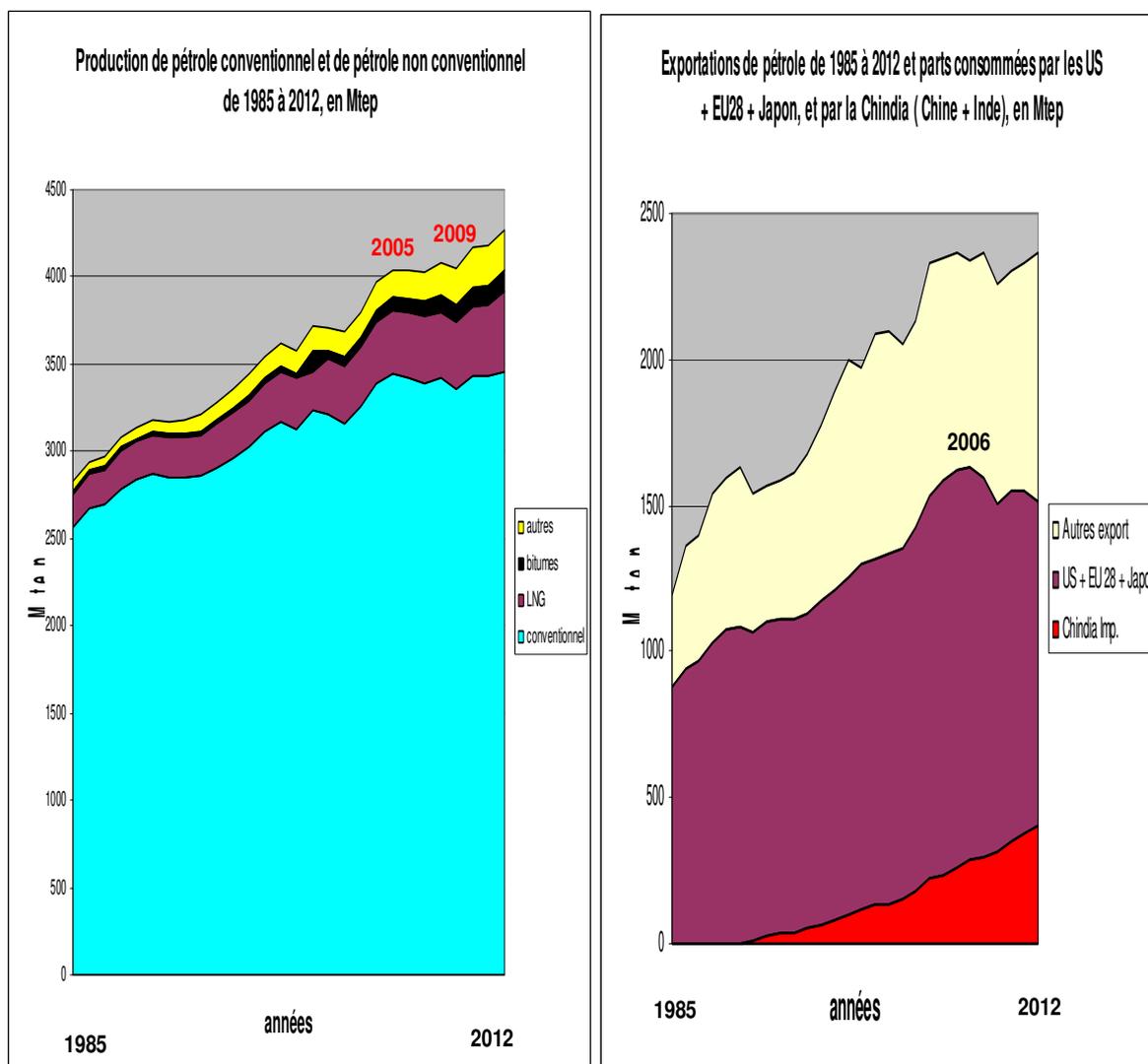


Figure 18: production et exportations mondiales de pétrole de 1985 à 2012.

3 – Un exercice de prospective

La figure 19 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, 12 Gtep fin 2012.

Ces prévisions paraissent bien optimistes, comme l'ont d'ailleurs été depuis maintenant presque 20 ans les prévisions de l'AIE, qui n'ont pas résisté à l'examen des faits.

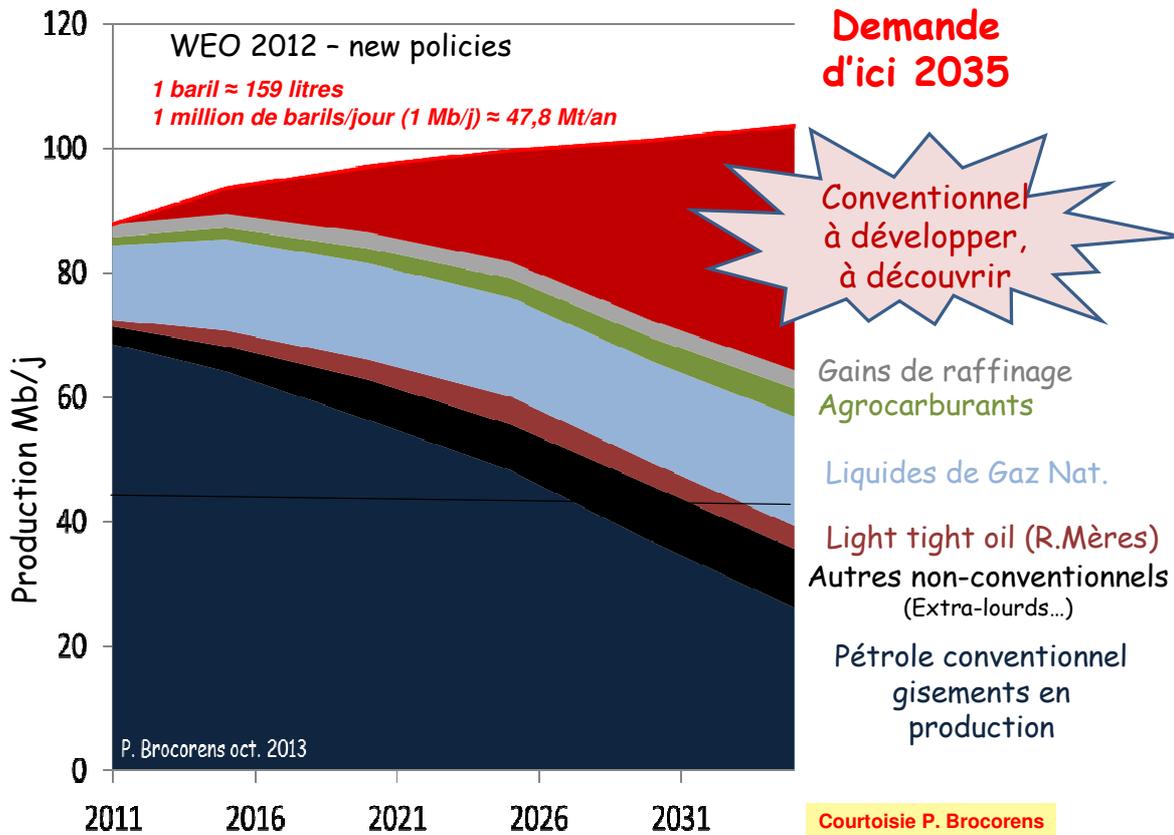


Figure 19: prévisions de la demande de pétrole mondiale d'ici 2035 et des moyens pour la satisfaire, selon l'AIE dans son scénario « New Policies » de son World Energy Outlook (WEO) 2012.

Voici pourquoi: si le déclin des gisements actuellement exploités de pétrole conventionnel, et l'évolution de la production du pétrole non conventionnel, semblent assez réalistes encore qu'optimistes, l'augmentation de la production de pétrole 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 sera capable de mettre en production l'équivalent de 3 fois la production actuelle de l'Arabie Saoudite! Cela paraît vraiment peu probable.

La figure 20 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'écémage 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.

Qu'est-ce qu'une courbe d'écémage, 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'écémage, 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 réserves dites «prouvées» (dites aussi 1P) annoncées par les compagnies ou les agences de l'Energie, 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 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.*

Ces méthodes de modélisations 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 **conventionnel** aurait lieu avant 2008. Il est admis à l'heure actuelle qu'il a eu lieu en 2006 !

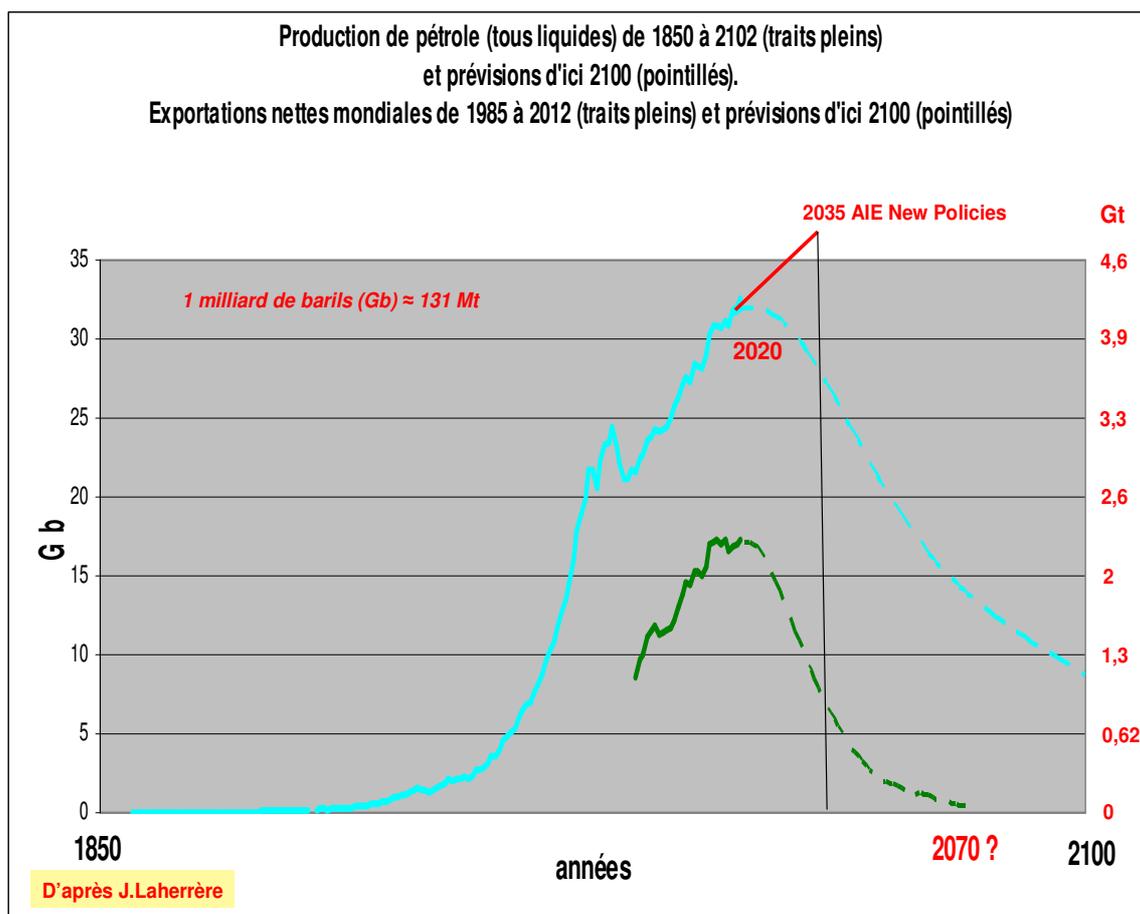


Figure 20: prévisions de l'évolution de la production de pétrole mondiale d'ici 2100, d'après les travaux de Jean Laherrère, et essai de prévision des quantités de pétrole qui pourront être mises sur le marché international.

Ces estimations prévoient que le pic mondial de la production pétrolière 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 1,5 Gt, soit à peu près 20 millions de baril par jour, 2 fois la production actuelle de l'Arabie Saoudite !

On voit également sur cette figure un essai de prévision des quantités de pétrole mises sur le marché mondial: elles diminueront bien plus vite que la production. Or cette question n'est pratiquement jamais évoquée dans les débats en cours. En 2035 elles pourraient être 3 fois plus faibles qu'actuellement, cela dans un contexte où la consommation de la Chine, mais aussi celle de l'Inde, auraient beaucoup augmenté pour alimenter leurs véhicules, ce qui ne laisserait pas grand-chose aux pays qui comme la France n'ont pas de ressources propres.

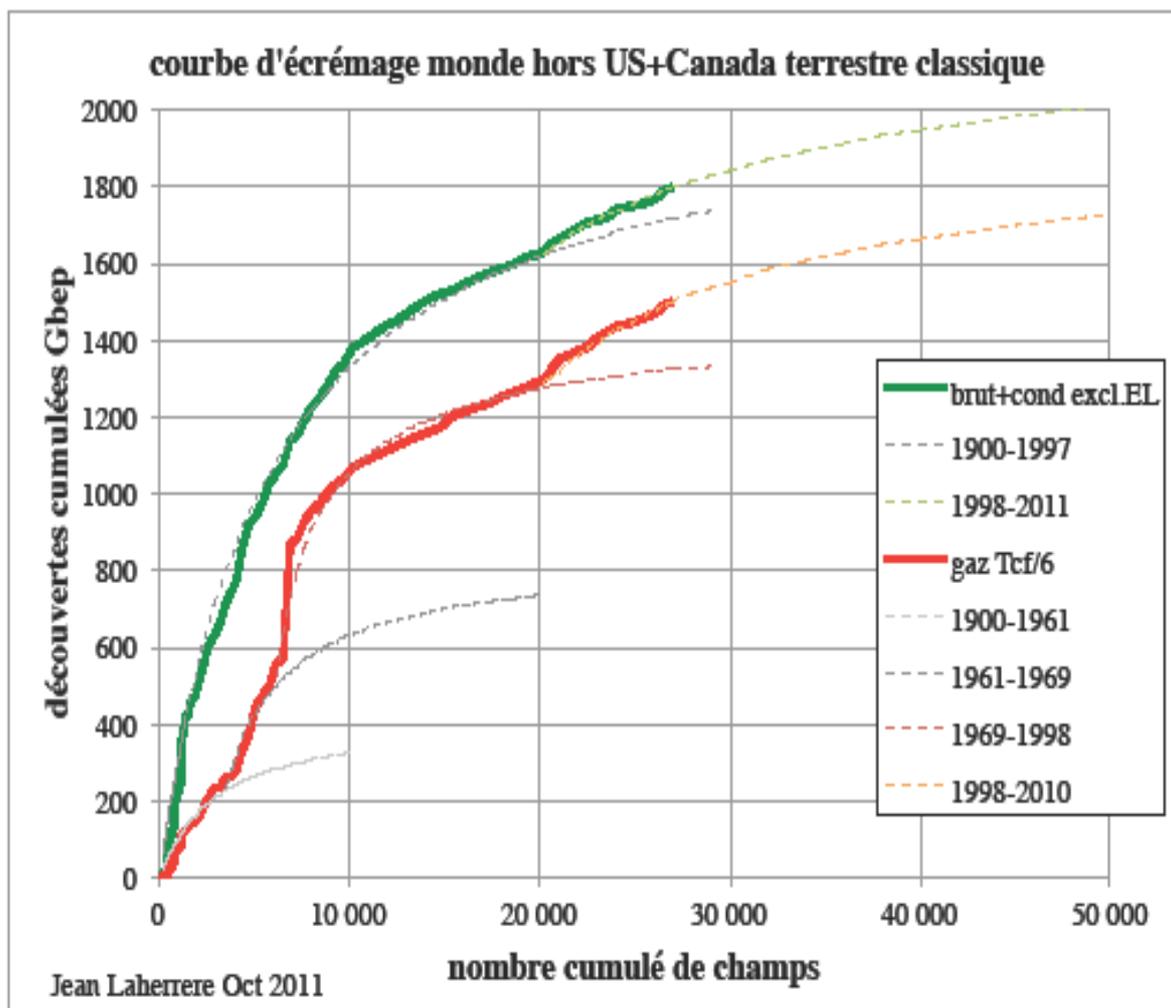


Figure 21: courbe d'écrémage pour le monde, à l'exclusion des gisements terrestres (onshore) des Etats-Unis et du Canada, et des extralourds (EL), c'est-à-dire pour l'essentiel les bitumes du Canada et les huiles extralourdes du Venezuela.

La figure 22 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.

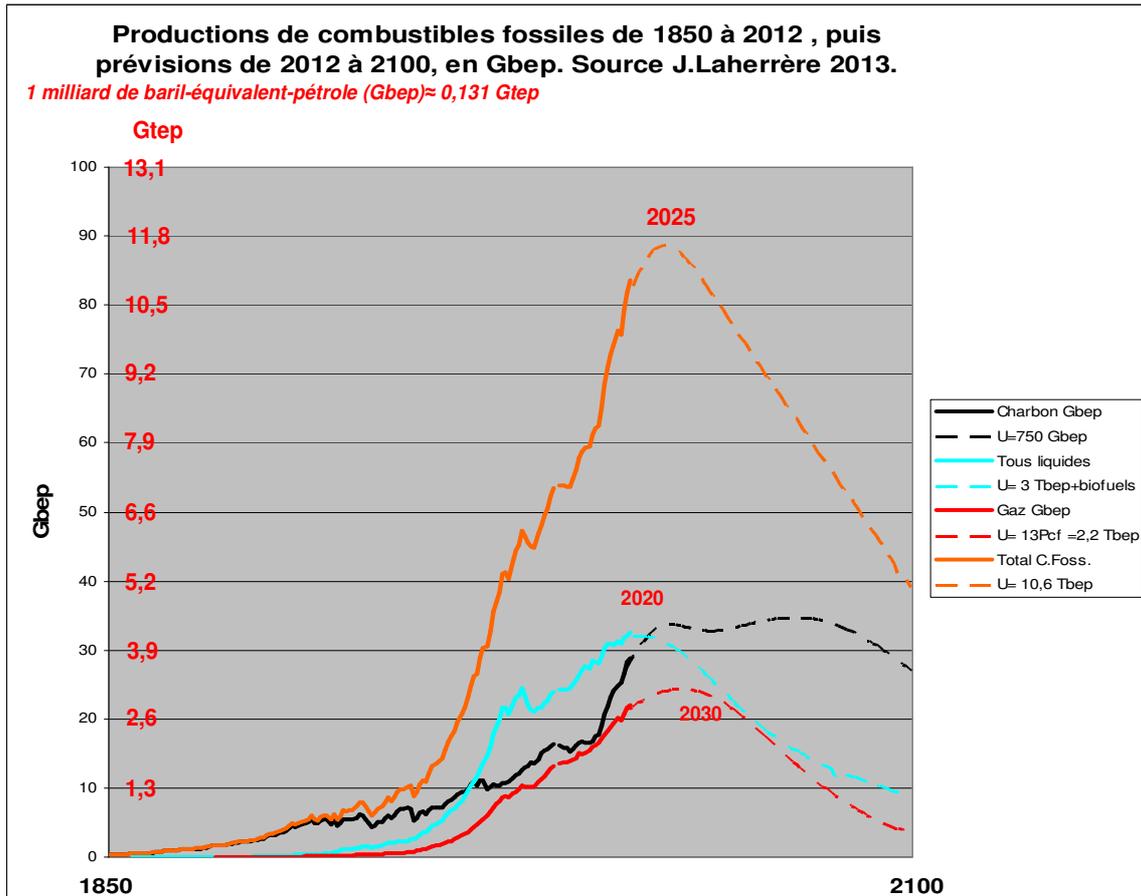


Figure 22: prévisions des productions mondiales de combustibles fossiles d'ici 2100, en l'absence de contraintes autres que géologiques.

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 23 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 !

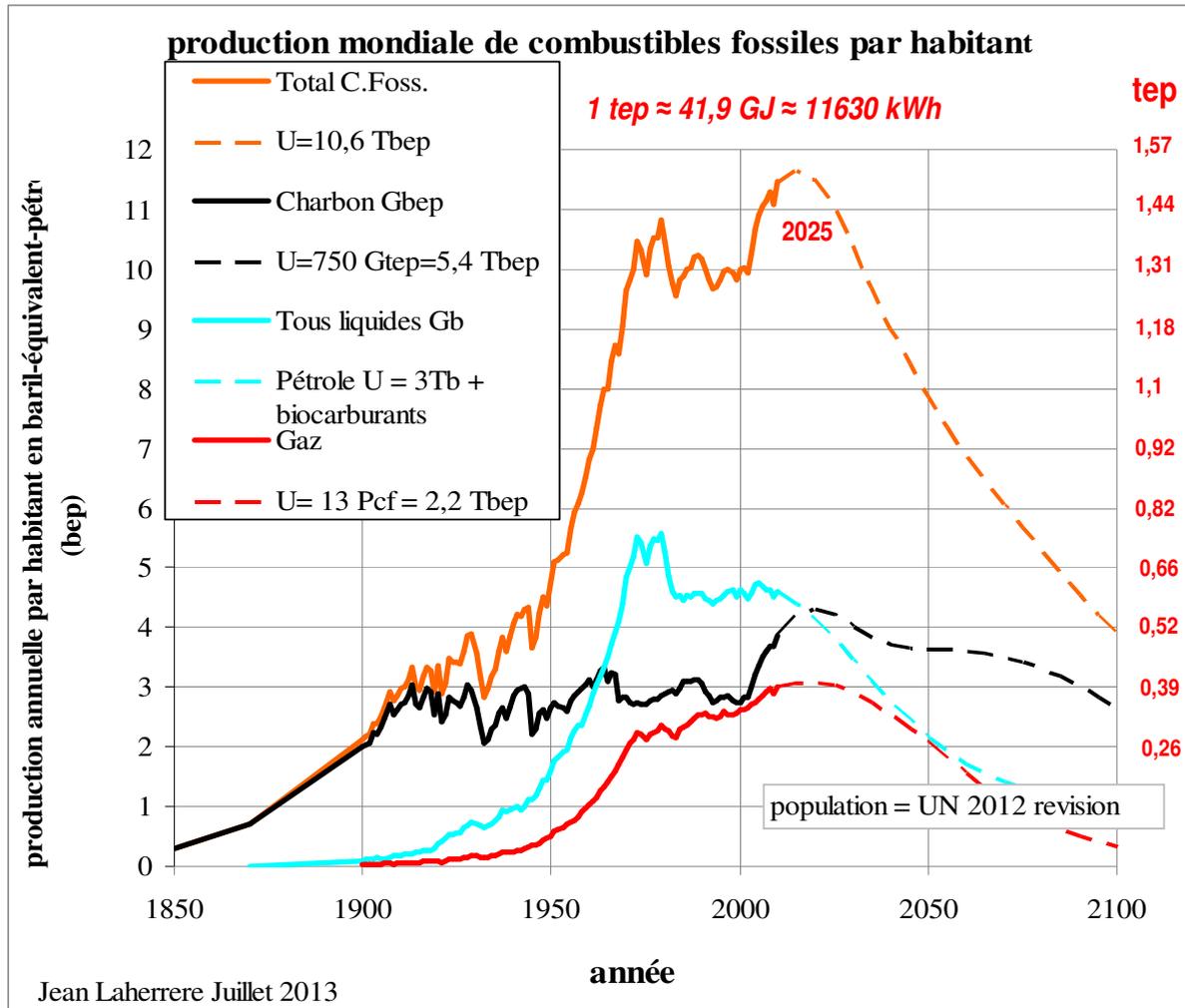


Figure 23: prévisions des productions moyennes de combustibles fossiles par habitant de la planète d'ici 2100.

Combustibles fossiles et Climat :

A partir de ces prévisions, on peut aisément déterminer l'évolution des émissions de gaz carbonique dues aux combustibles fossiles d'ici 2100 (figure 24). Le charbon est déjà le plus grand contributeur, mais son influence serait prépondérante après 2025. Si l'on compare ce scénario avec les scénarios dits SRES (pour Special Report on Emissions Scenarios) du GIEC (pour Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) on voit (figure 25) qu'il se situe dans la partie basse de l'éventail de ces scénarios.

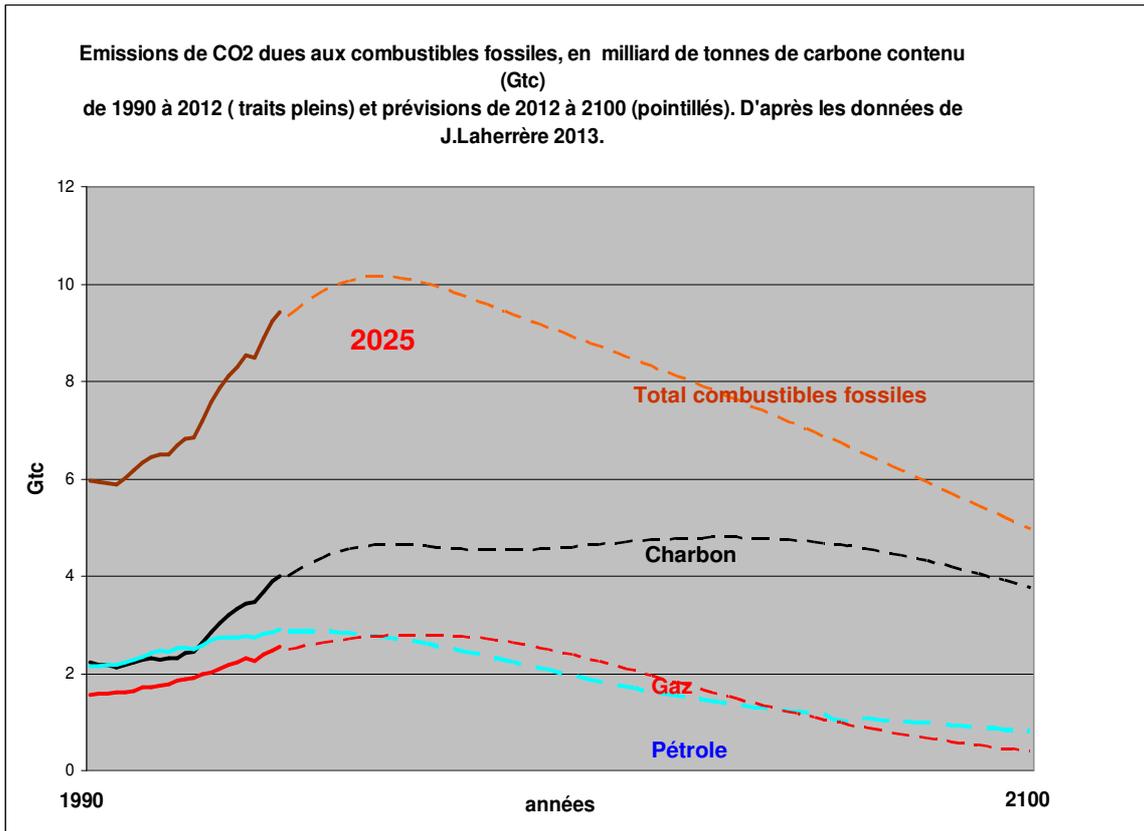


Figure 24: émissions de CO₂ calculées à partir du scénario de production des combustibles fossiles de la figure 21.

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. Mais c'est le combustible fossile dont les prévisions de production sont les plus incertaines.

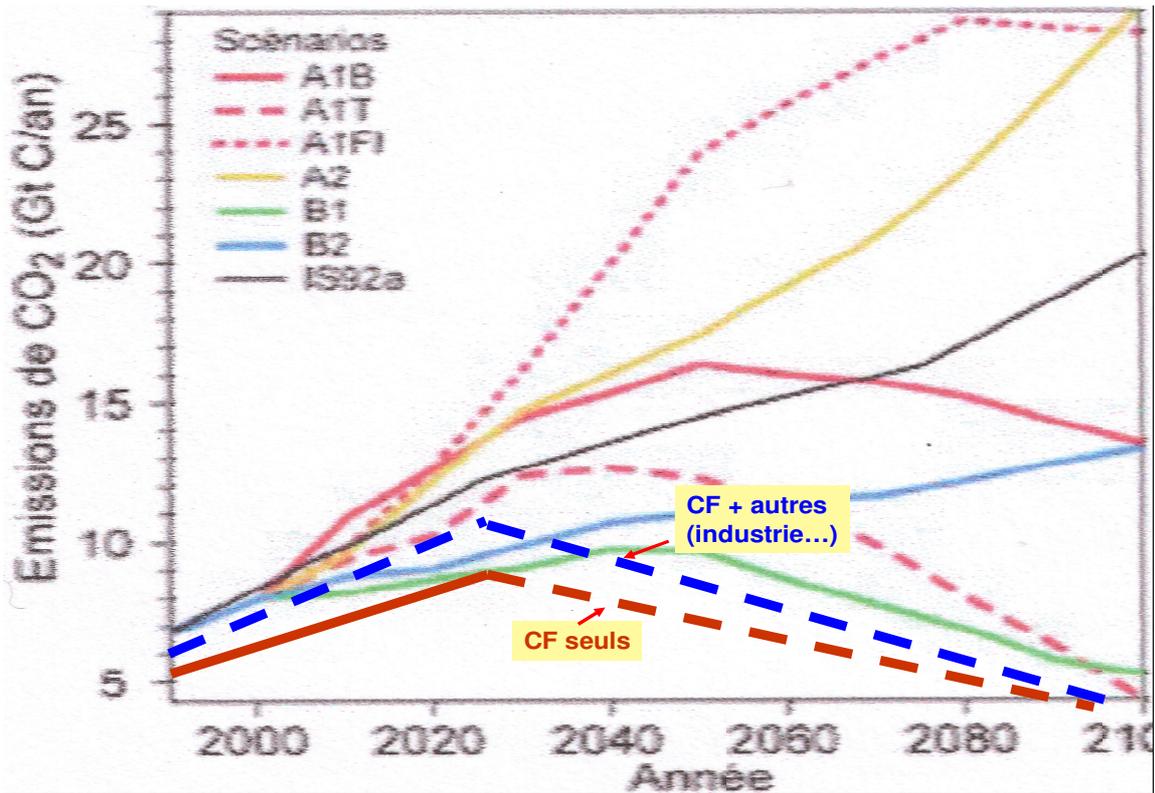


Figure 25: situation des émissions prévisibles de CO² dues aux combustibles fossiles dans l'éventail des émissions de CO² correspondant aux scénarios SRES.

On ne prend pas en compte ici les possibilités d'exploitation du charbon par gazéification souterraine, ou de production d'huile par pyrolyse de schistes bitumineux, qui bouleverseraient ces prévisions. Mais les inconvénients environnementaux et les difficultés de telles exploitations sont tels qu'il semble peu probable qu'elles se développent un jour à grande échelle.

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 SRES utilisés comme référence par le GIEC.

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 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 en théorie se produire qui ne sont pas anticipées ici: par exemple un extraordinaire développement du pétrole de roches-mères à l'échelle mondiale qui viendrait compenser le déclin du pétrole conventionnel, ou un fort développement des centrales nucléaires au Moyen-Orient qui permettrait d'y fermer les centrales à fuel comme a fait la France après les chocs pétroliers, et de consacrer le pétrole ainsi économisé à l'exportation, ou encore un développement très rapide des véhicules peu consommateurs qui permettrait de s'adapter au déclin de la production. Mais de telles modifications, pour autant qu'elles aient lieu, ont peu de chances de se produire à un rythme permettant de compenser le déclin prévisible de la production pétrolière.

Références

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.

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>

Remerciements

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