

"Réflexions sur les lois de la nature et les prévisions énergétiques"par Jean Laherrere e-mail jean.laherrere@wanadoo.fr**Table de matière de l'exposé**

- 1-Nature et science
- 2-Pétrole
- 3-Gaz
- 4-Combustibles fossiles et énergie primaire
- 5-Economie
- 6-Population
- 7-Agriculture
- 8-Climat
- Conclusions**

-1-Nature et science**-Nature****-Théories actuelles et réalités**

-une nouvelle théorie remplace une ancienne en apportant plus de solutions, mais elle sera elle-même remplacée plus tard

-le point sans dimension, la droite infinie, l'infiniment grand et l'infiniment petit **n'existent pas dans la Nature**

-tout est courbé par la matière

-**tout ce qui naît, meurt ou mourra**: le Soleil, la Terre, les espèces, les hommes. **Seuls les protons sont éternels.**

-**tout est limité**: l'âge de l'Univers est environ 14 Ga, en année-lumière = $2 \cdot 10^{24}$ m, le nombre de protons est 10^{80}

Il y a 10^{23} protons dans une goutte d'eau. Mais la densité moyenne de l'Univers est de quelques particules par mètre cube. Le noyau dans un atome représente proportionnellement un mouche dans une cathédrale. **L'Univers est donc surtout du vide!**

On ne connaît pas la taille de l'électron (découvert il y a plus de 100 ans). **L'électron** a été d'abord une particule, puis une onde (avec de Broglie), puis onde et particule et maintenant **ni onde, ni particule.**

Il existe un quantum d'énergie, donc de matière et d'espace, mais les théories actuelles ne disent rien sur un quantum de temps?

La mécanique quantique est contradictoire avec la théorie de la relativité.

Personne ne comprend la mécanique quantique (a dit Richard Feynman, qui est le scientifique le plus grand et le plus complet du 20e siècle)

La théorie du tout (Einstein a passé plus de 30 ans à la chercher en vain) est supposée être résolue par la théorie des cordes où les particules sont remplacées par des supercordes "infiniment" petites qui vibrent. Les théories des cordes (il y en a plusieurs) existent depuis plus de 30 ans et des milliers de chercheurs y travaillent sans succès jusqu'à présent.

La cosmologie veut expliquer l'Univers et son devenir (expansion infinie ou cyclique), **alors que l'on ignore 93% de sa composition, appelé énergie sombre = 70% et matière sombre 24%!**

Le temps peut être courbe comme l'espace, sans début, ni fin.

La Nature n'est pas linéaire et les problèmes ont plusieurs solutions.

Les mathématiques ne résolvent pas tous les problèmes: comme pour les 3 corps de Poincaré, ce qui explique le comportement chaotique du système solaire.

-Modélisation

-Evénement dans le temps = cycles

La croissance permanente n'existe pas dans la Nature.

Une bactérie, qui double toutes les demi-heures, disposant de toutes les ressources nécessaires, occuperait le système solaire en une semaine et l'Univers en 11 jours!!

Tout ce qui monte, doit redescendre.

Tout ce qui naît, doit mourir.

Tout événement naturel peut être modélé avec un ou plusieurs cycles symétriques (courbe en cloche).

Figure 1-1: Vache folle au Royaume-Uni

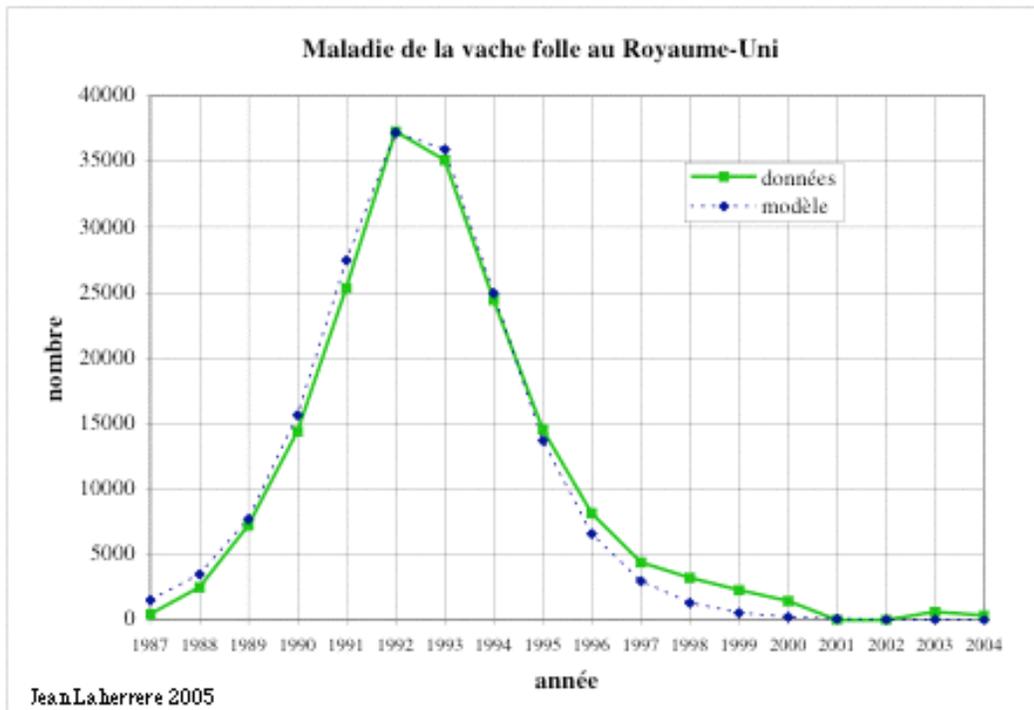


Figure 1-2: Nombre de puits forés aux Etats- Unis

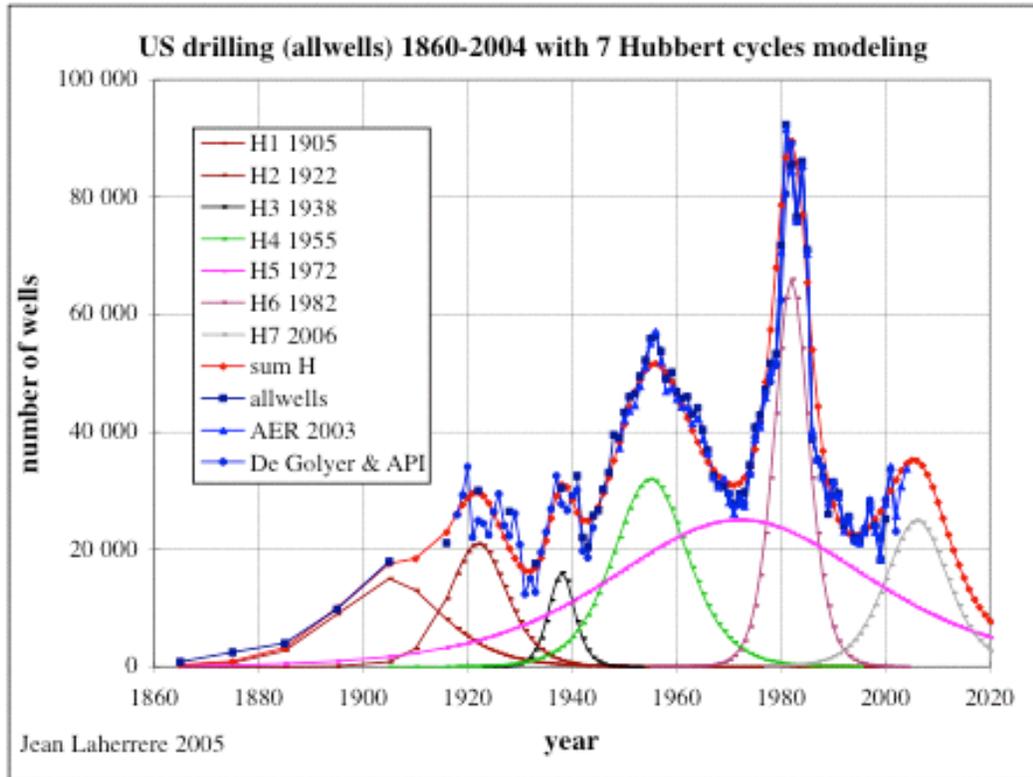
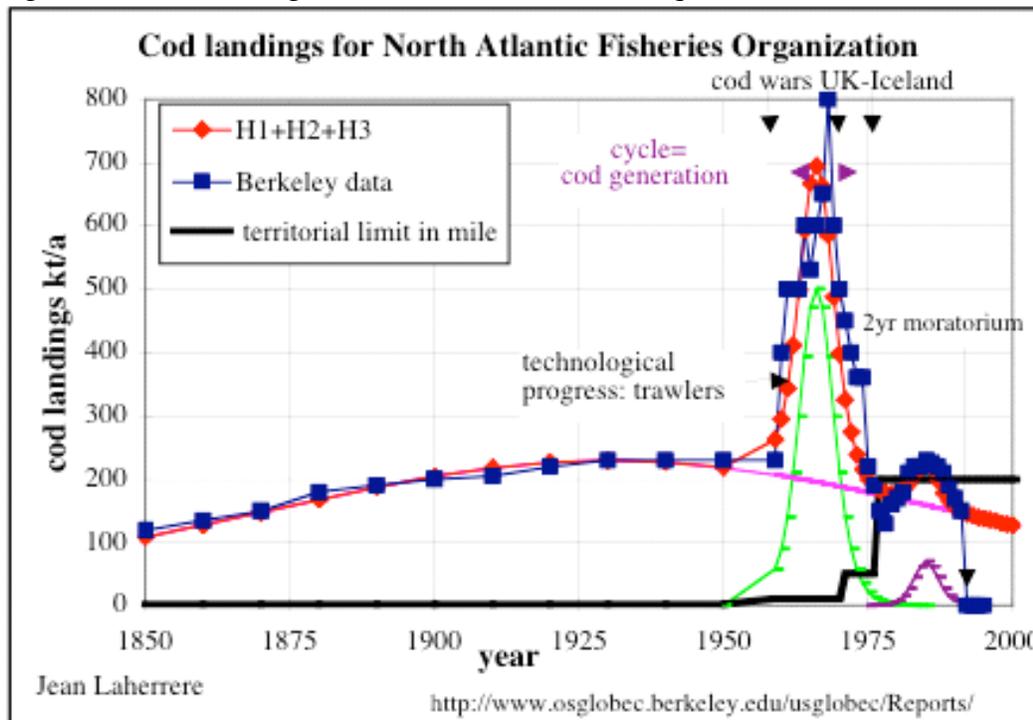


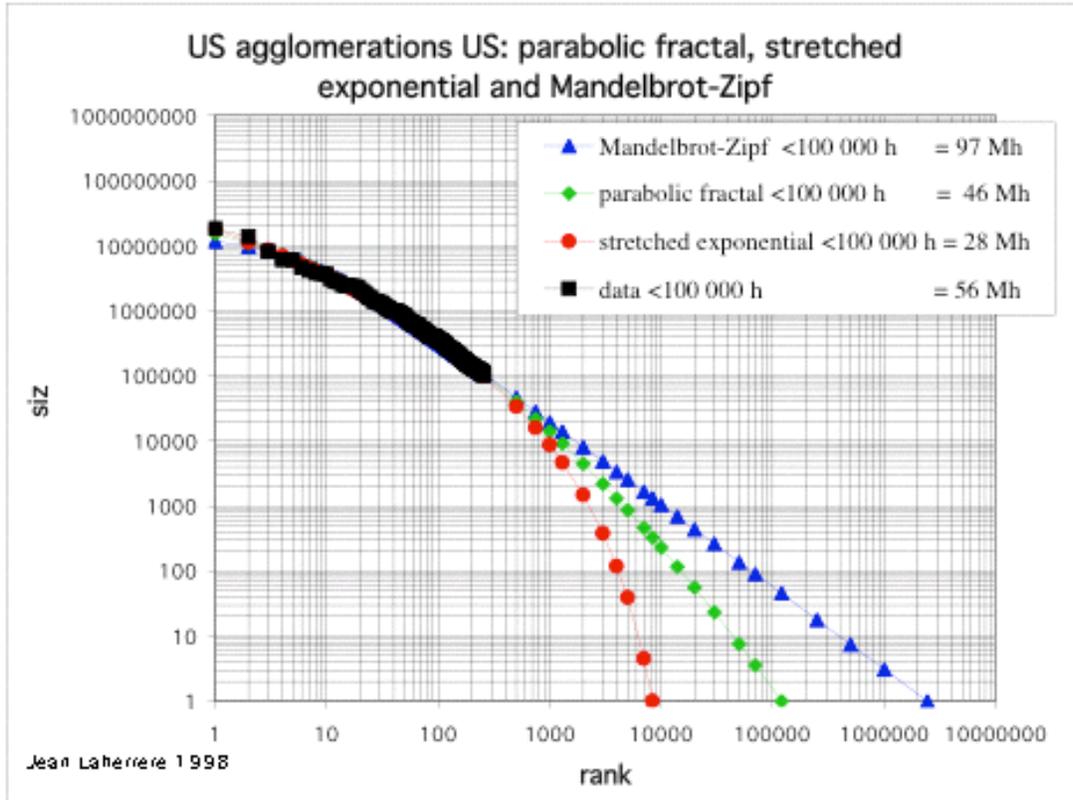
Figure 1-3: volume de prises de morue dans l'Atlantique Nord



-Distribution d'après la taille des objets

La Nature est caractérisée par l'auto-similarité = une partie est semblable au tout (chou-fleur) = fractale dans une représentation taille-rang log-log,
 auto-similarité parfaite = fractale linéaire (en fait loi de puissance)
 mais auto-similarité limitée (côte de Bretagne) = fractale courbe

Figure 1-4: nombre d'agglomérations urbaines aux Etats-Unis

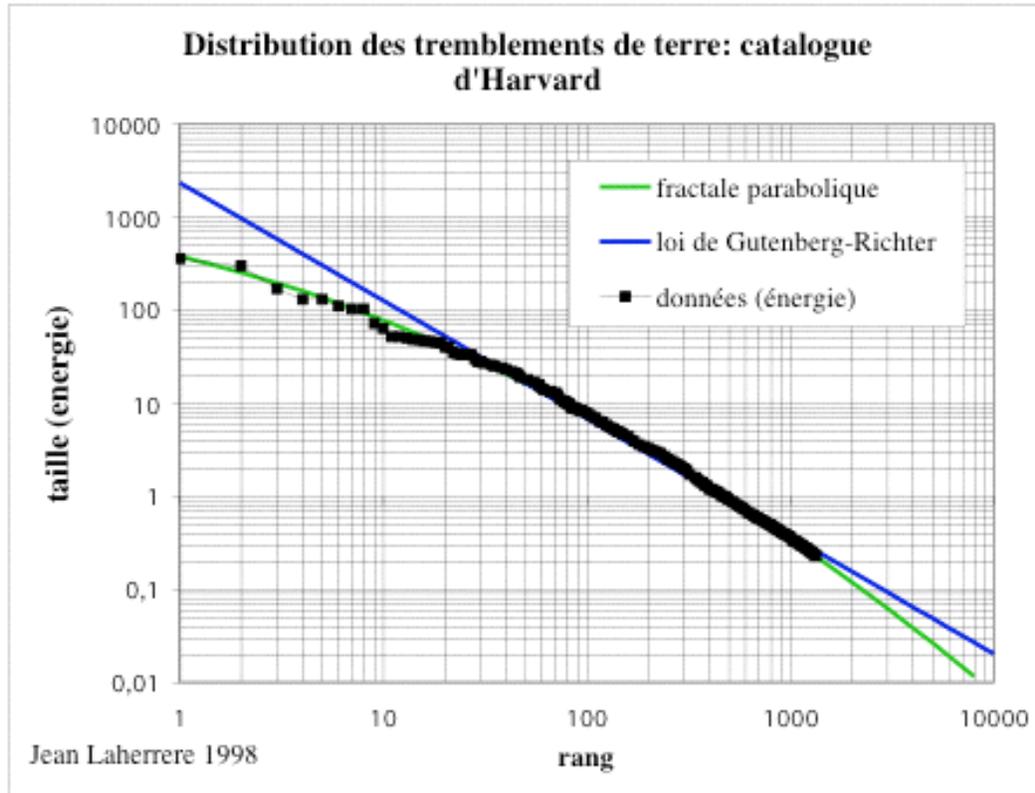


Les agglomérations urbaines de plus de 100 000 habitants aux US (en 1998 avec un total de 187 millions d'habitants) donne un tracé fractal (taille rang, log-log) courbe et les trois modèles : Mandelbrot, fractale parabolique et exponentielle étirée (Laherrere et Sornette 1998) s'ajustent très bien aux données mais divergent ensuite. On peut calculer le nombre total de personnes vivant dans les agglomérations de moins de 100 000 habitants en suivant le modèle jusqu'à l'agglomération minimum à savoir une personne par agglomération.

La loi de Mandelbrot Zipf (loi de puissance avec ajoutant une constante au rang présenté par Gell-Man pour le parfait modèle dans son livre «Le quark et le guépard») devient une droite pour les rangs élevés et donne pour les US une population de 97 millions de personnes vivant dans les agglomérations de moins de 100 000 habitants. Le modèle exponentielle étirée donne un total de 26 millions, alors que la fractale parabolique donne un total de 46 millions. La réalité est 56 millions (vivant dans les agglomérations inférieures à 100 000 habitants): donc la fractale parabolique est le meilleur modèle.

La loi de Gutenberg-Richter sur les tremblements de terre est une loi de puissance (fractale linéaire) mais les données d'Harvard (> 4000 séismes) montre que la distribution est courbe et que la loi de Gutenberg-Richter n'est que la tangente à la courbe, étant fautive pour les grands et les petits séismes

Figure 1-5: tremblements de terre: magnitude-nombre



Loi de Benford

Extrait Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Série II a: Sciences de la Terre et des Planètes publié t.322, Série IIa n°7, p.535 à 541, 4 Avril 1996 « Distributions de type "fractal parabolique" dans la Nature » Note de Jean Laherrère présentée par le Professeur Deheuvels

-4-Distribution du premier chiffre décimal d'un ensemble naturel

Benford (1938) a mis en évidence le fait que pour de nombreux exemples naturels (superficie des lacs, par exemple) le premier chiffre décimal x vérifiait une loi de répartition de la forme $P(x=n) = \log(1+1/x)$ pour $n=1,2,\dots,9$. Ceci peut également être interprété par un tracé fractal parabolique: les petites valeurs sont beaucoup plus abondantes que les grosses. La loi de Benford donne une distribution fractale parabolique parfaite: $b=0,75$, $c=0,12$, $R^2=1$. Un relevé de 4000 adresses que nous avons effectué dans un annuaire téléphonique suit assez bien la loi de Benford.

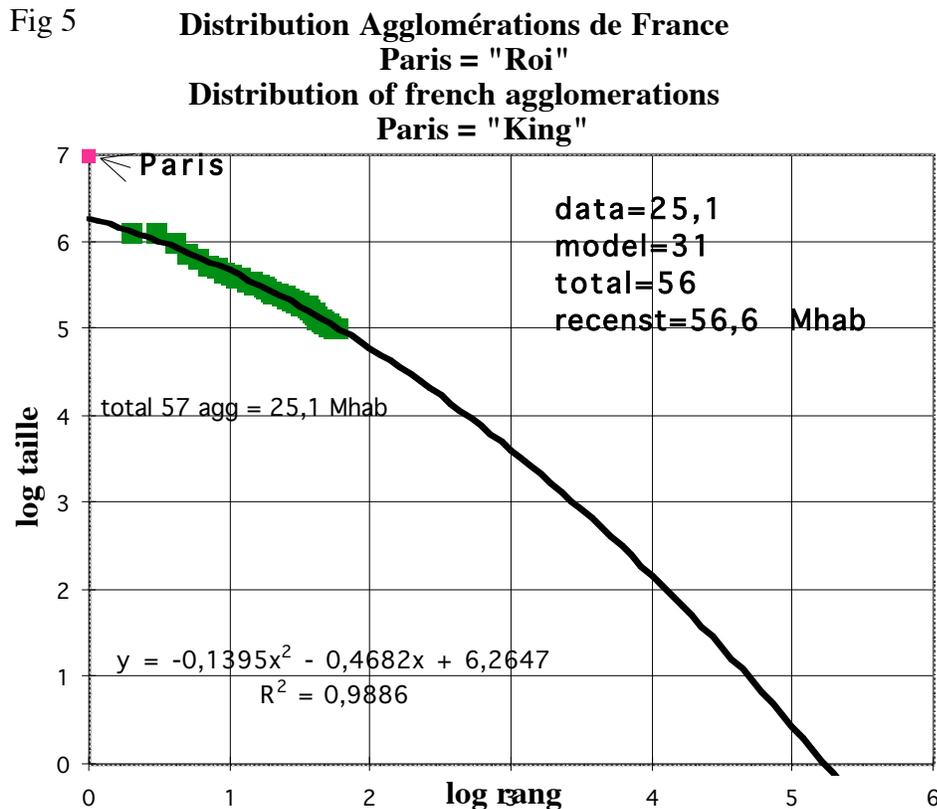
La loi de Benford est utilisée pour vérifier les séries naturelles, notamment les déclarations d'impôt, car les séries fabriquées à la main ne suivent pas la loi de Benford

Effet Roi = King

Le tracé des agglomérations pour la France montre un tracé très anormalique pour le premier rang. Le tracé est parabolique, sauf pour le premier rang: c'est l'effet **Roi** (voir Laherrère *Pétrole et Techniques déc.* 1994)). Lorsqu'un nouveau Roi émerge au milieu de barons de richesse équivalente, il élimine ses rivaux pour assurer son règne et prend leurs richesses: il devient ainsi sans rival, anormalique. C'est le cas de Paris avec une agglomération de près de dix millions d'habitants, suivi par des agglomérations de l'ordre d'un million. Sans Paris, le tracé est

parabolique (**Figure 5**: $b=0,5$, $c=0,14$, $R^2=0,989$) et l'extrapolation fournit une population totale en accord avec la réalité.

Figure 1-6: **distribution des agglomérations en France : Paris = King**



Londres et Moscou sont des **Kings** dans les agglomérations du Royaume-Uni et de la Russie, mais pas New-York

-Inégalité

La Nature est caractérisée par l'inégalité: 99% de l'Univers visible est sous forme de plasma où le solide constitue une partie très faible.

Il ne faut pas confondre égalité à la ligne de départ et égalité à la ligne d'arrivée. Au départ 300 millions de spermatozoïdes, mais un seul a fécondé l'ovule qui nous a produit.

Pareto (1848-1923) a énoncé son fameux 80/20 sur les distributions taille-nombre: c'est une loi de puissance ou une fractale linéaire:

80% des subventions aux fermiers vont à 20% des fermiers.

80% des dépenses de maladies sont pour 20% des malades.

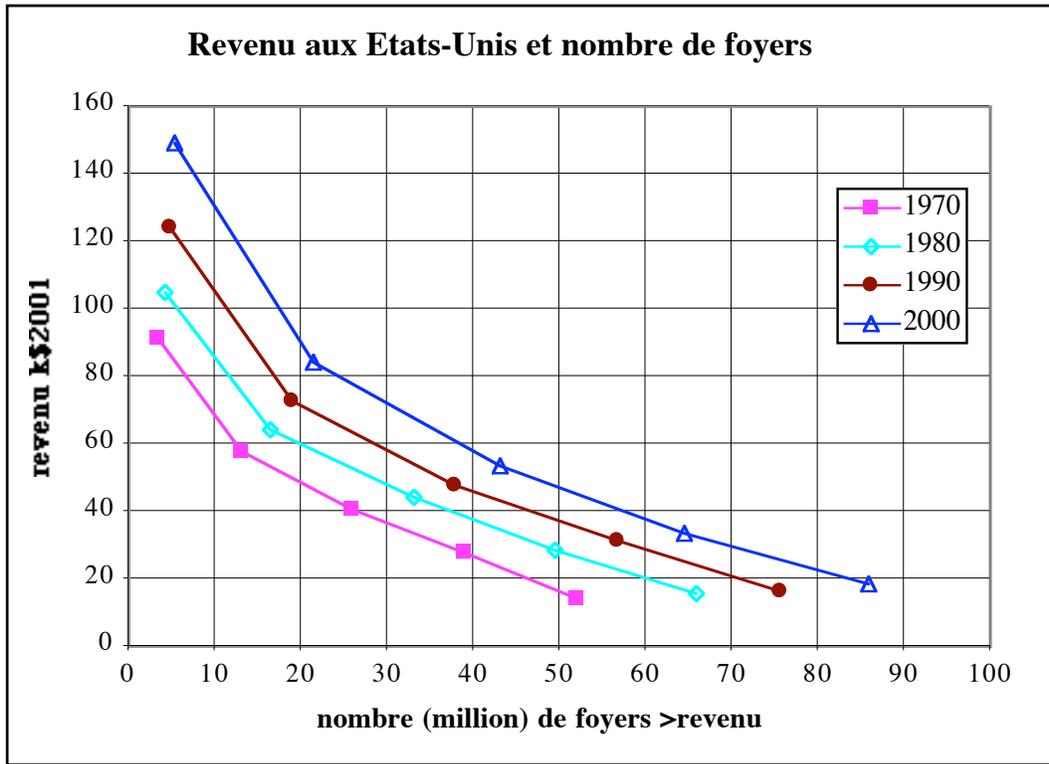
Depuis le début de la vie avec les bactéries, les espèces ont évolué vers une plus grande complexité, avec actuellement l'homme au bout de la chaîne, mais le centre de gravité reste à peu près le même.

Actuellement sur Terre, ce sont encore les bactéries qui dominent en nombre.

Pour l'évolution des revenus, on parle d'inégalité qui augmente sur des ratios discutables, sans se préoccuper de l'augmentation du nombre de bénéficiaires. L'inégalité est surtout jugée sur les revenus monétaires des individus (et non sur leur bonheur de vivre).

Les courbes des revenus en fonction du nombre de ménages évoluent en parallèle avec le temps aux US

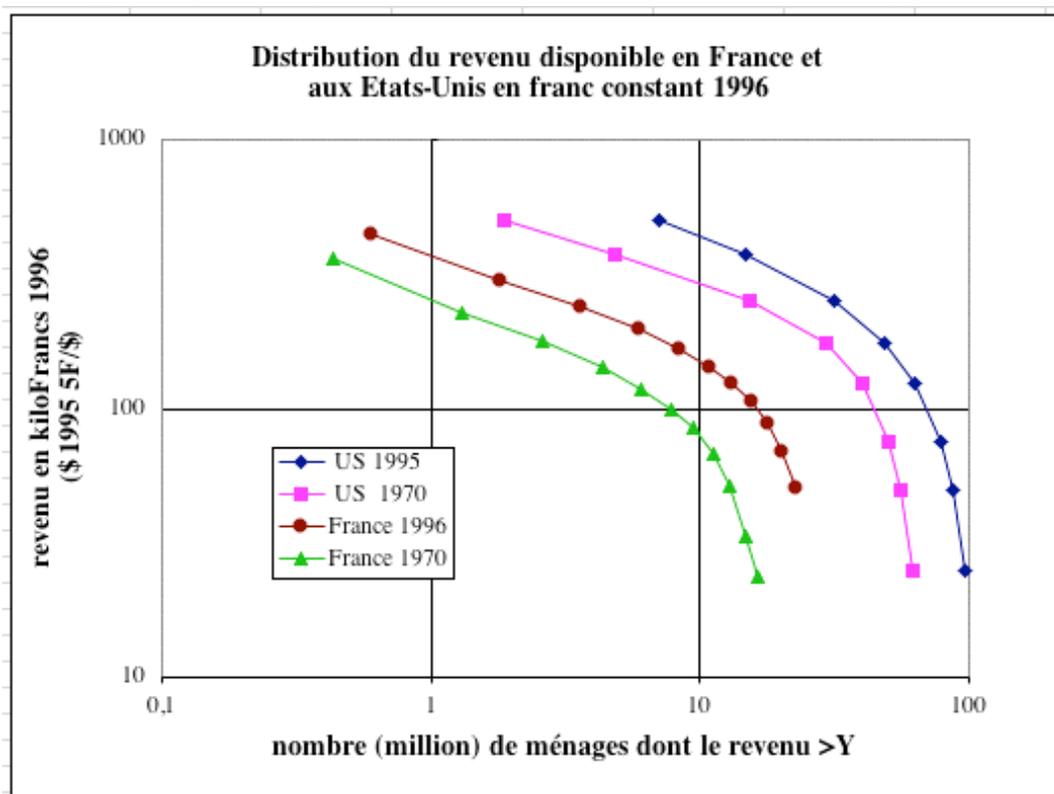
Figure 1-7: distribution revenus-nombre de foyers aux Etats-Unis de 1970 à 2000



Le fauché d'hier peut devenir le plus riche d'aujourd'hui = Gates. Le plus riche d'hier peut être fauché aujourd'hui = Khodorkovski

Dans une présentation fractale (taille-rang log-log) il est remarquable que ce parallélisme dans le temps aux US coïncide avec aussi celui de la France.

Figure 1-8: revenus en France et aux Etats-Unis en Franc 1996

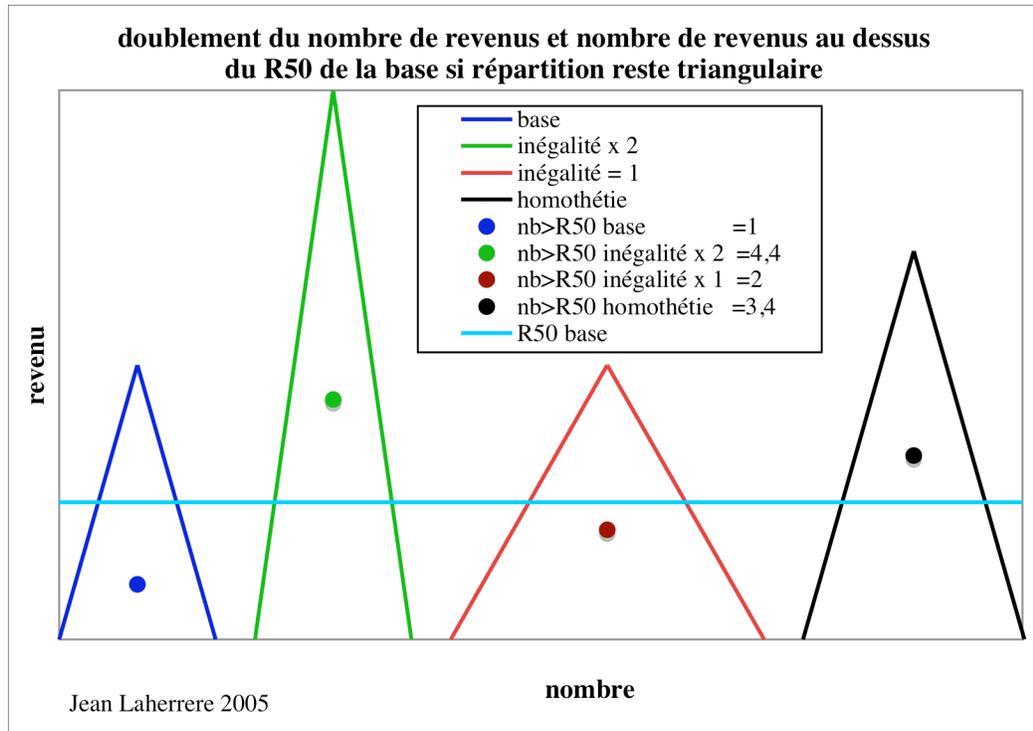


le parallélisme est remarquable, si la France avait autant de ménages que les EU, nos riches seraient aussi riches

L'augmentation de la population augmente l'inégalité si on veut diminuer le nombre des plus démunis. **Ne pas élever l'inégalité augmente le nombre des plus démunis.**

Dans un schéma où le nombre de ménages est reporté par tranches de revenus, on obtient grossièrement une distribution triangulaire. La surface du triangle donne le nombre total de ménages. Si le nombre de ménages double la surface double, elle peut doubler en gardant la même inégalité (même hauteur du triangle) mais alors le nombre de ménages au plus bas niveau double aussi. On peut garder le même nombre de revenus minimums, mais alors l'inégalité double. On peut penser qu'une homothétie est un juste équilibre mais il y aura plus de revenus minimum que dans le cas où l'inégalité double! Le schéma ci-dessous donne le rapport nombre de revenus au dessus du revenu moyen (R50) par rapport à ce revenu moyen dans les différents cas.

Figure 1-9: schéma d'une distribution des revenus et du nombre de revenus avec doublement du nombre



Les Français sont sensibles à l'égalité et à l'abolition des privilèges, mais la majorité joue au Loto, non pas pour gagner de quoi s'acheter un appartement, mais 100 appartements; le slogan est alors: **plus riche que riche**. Les syndicats du secteur public (SNCF, EDF) s'accrochent à leurs avantages évidents (salaire, sécurité, retraite) par rapport au secteur privé.

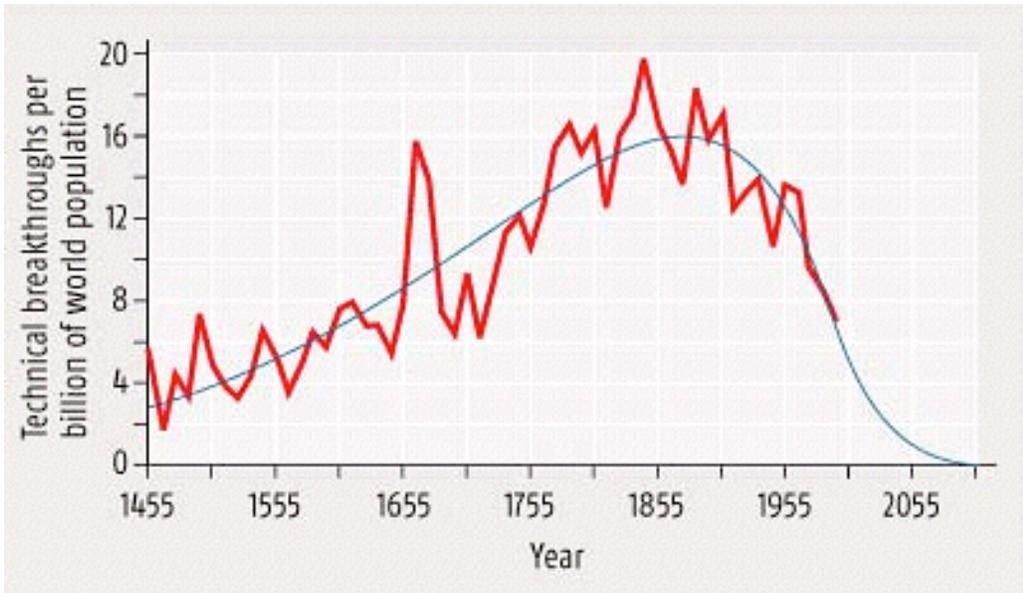
-Science et technique

-Pic de la science

Jonathan Huebner, physicien pour le Pentagone, dans son livre de 2005 «*Technological Forecasting and social change*» se base sur le livre 2004 «*History of Science and Technology*» de Bunch & Hellems qui recense 7200 innovations fondamentales pour dire que le pic de la technique est passé.

Le taux aujourd'hui est de sept innovations importantes par milliard d'habitants par an, comme en 1600.

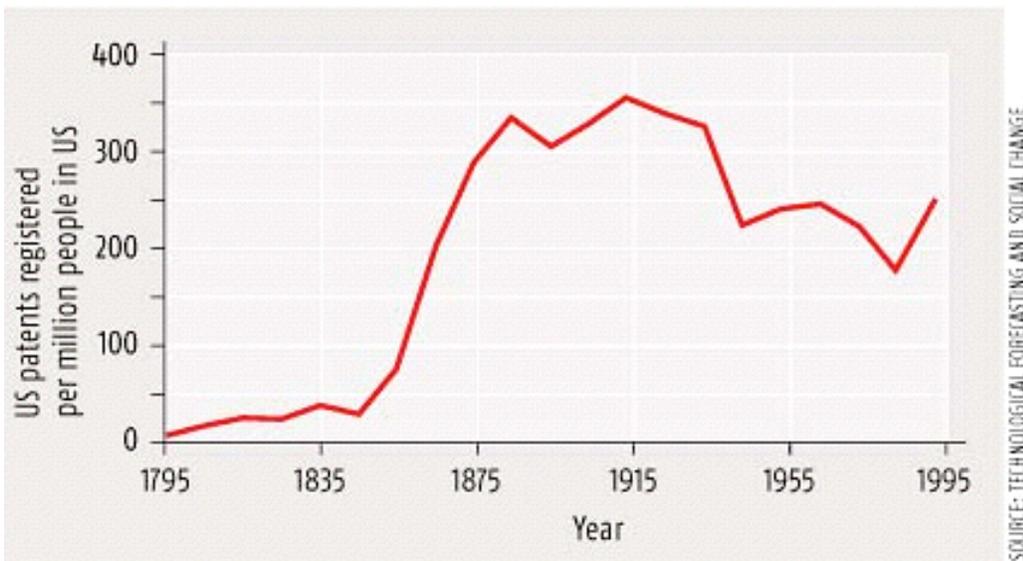
Figure 1-10: nombre d'innovations par milliard d'habitants 1450-2000 d'après Huebner



La machine à vapeur, le moteur à combustion interne et l'électricité (fin XIXe siècle) sont des inventions plus importantes que l'ordinateur (K. Boulding), car on peut vivre sans ordinateur mais pas sans eau (pompe), et les six milliards peuvent être nourris grâce aux transports.

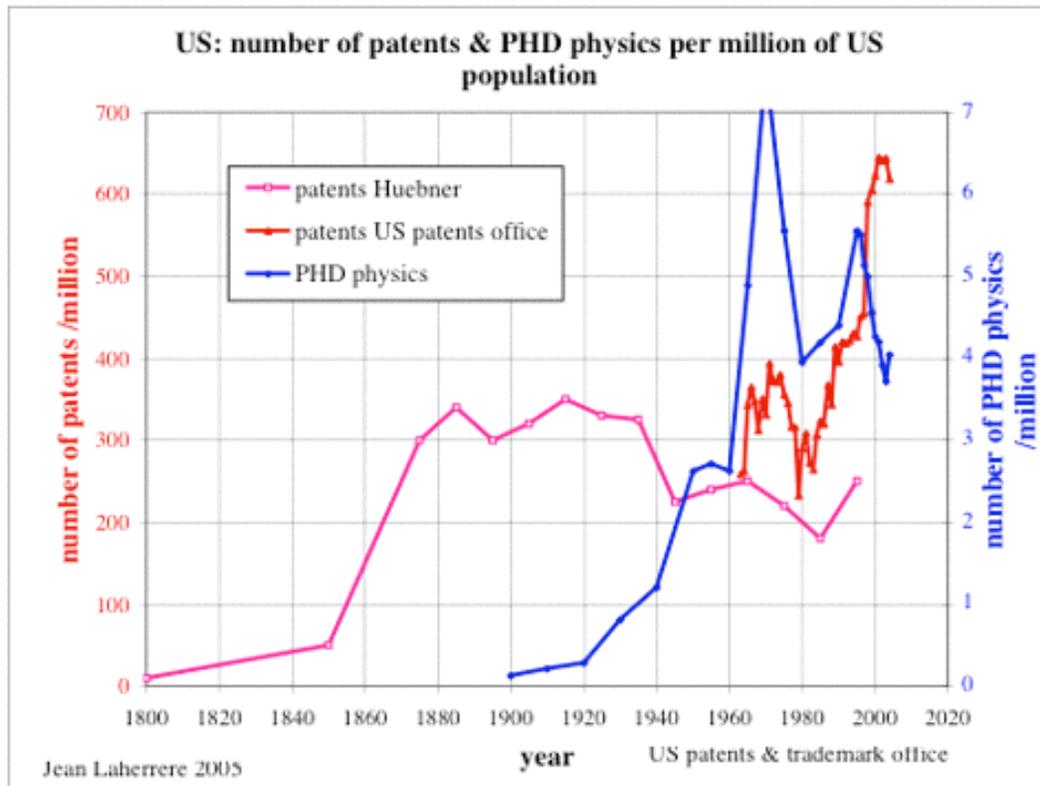
Le nombre de brevets aux US par habitant est aussi en déclin

Figure 1-11: nombre de brevets US par million d'habitants 1795-1995 d'après Huebner



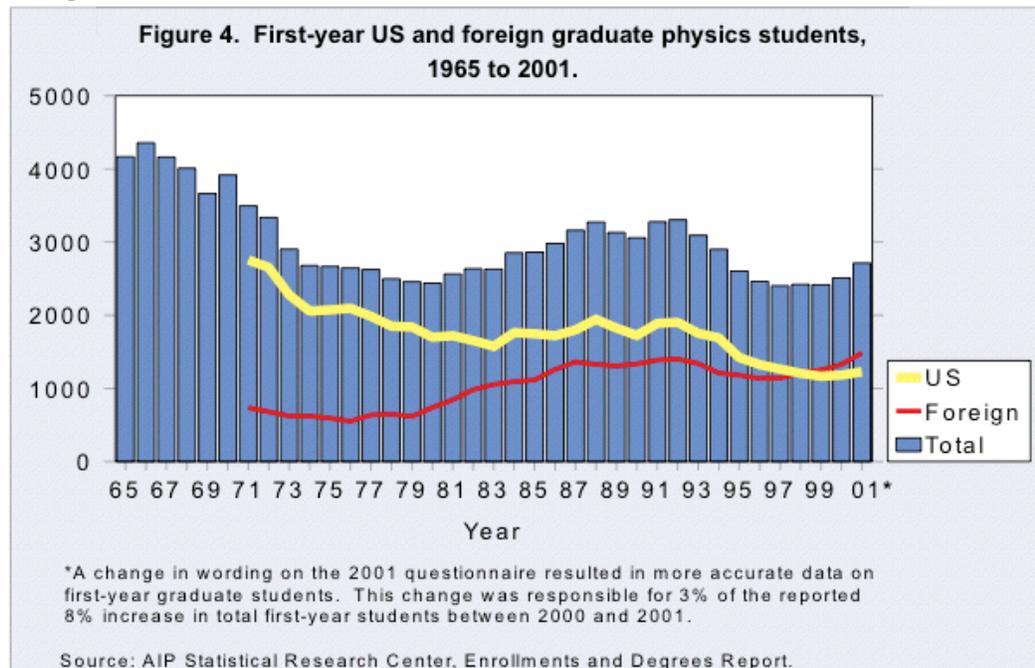
Cependant les données plus récentes montrent pour les brevets plutôt un 2^e pic en 2001 bien supérieur à celui de 1910, et pour les PHD de physique un pic en 1970, avec un pic mineur en 1995.

Figure 1-12: US: nombre de brevets et de PHD de physique par million d'habitants 1800-2005



La proportion d'étudiants étrangers aux US augmente dans les sciences physiques, dépassant les étudiants américains depuis 1999.

Figure 1-13: US: nombre d'étudiants en première année de physique d'origine américaine et étrangère 1965-2001



*A change in wording on the 2001 questionnaire resulted in more accurate data on first-year graduate students. This change was responsible for 3% of the reported 8% increase in total first-year students between 2000 and 2001.

Source: AIP Statistical Research Center, Enrollments and Degrees Report.

J. Horgan « The end of science: Facing the Limits of (Human) Knowledge in the Twilight of the Scientific Age » 1997, éditorialiste de Scientific American, a interviewé d'éminents scientifiques et conclut que la science théorique semble en déclin ou dans une impasse.

Mais certains parlent de la loi des retours accélérés (R. Kurzweil 2001 « The Law of Accelerating Returns») en se basant sur les miracles de la technologie et la loi de Moore qui est une loi exponentielle, oubliant que la Terre est finie!

Tout ce qui monte redescend un jour, tout ce qui naît meurt !

-2-Pétrole

-2-1-Quelques rappels sur les hydrocarbures

Historique

Les feux éternels (gaz naturel) ont été l'objet de culte à Kirkouk il y a 6 000 ans. Les Chinois ont exploité du sel, il y a 3 000 ans en découvrant du gaz (forage au bambou à 200 m) qu'ils ont utilisé pour faire sécher la saumure.

Le **bitume** est signalé dans la Bible (Mer Morte). Il a été utilisé dès l'Antiquité pour l'étanchéité des bateaux, comme mortier pour les maisons et les feux grégeois. Les premiers puits d'huile à la main ont été forés à Bakou en 1594 (35 m).

Les **sables bitumineux** ont été exploités à Pechelbronn dès 1735, forage à la tarière en 1835 à 35 m. Les **schistes bitumineux** (ni schistes, ni bitume!) ont été exploités comme combustibles vers 1750 en Chine et en 1837 en **France à Autun** et en 1850 en Ecosse.

Le **premier forage moderne (à câble)** a eu lieu en **1848 à Bakou**, en 1854 en Pologne, en 1858 au Canada et enfin en 1859 (23 m fore sur une rivière appelée Oil Creek) aux Etats-Unis (pour les Américains c'est le premier!). Le premier forage rotary date de 1902 et est encore le système utilisé.

Génération du pétrole

-production annuelle MO (matière organique)= 23 Gt océans 0,7 Gt terre

La grande majorité de la MO est oxydée avant sédimentation.

-MO fossile dans les sédiments = <1% MO produite cumulée sur 500 Ma

-ressources de combustibles fossiles concentrés = 1% MO fossile

-réserves ultimes pétrole conventionnel = 0,3 % ressources

La MO préservée dans les sédiments (roche mère \approx 5% MO) se transforme en champs de pétrole si:

Enfouissement avec un gradient thermique \approx 30°C/km

Génération de pétrole (fenêtre à huile 1 km-4 km),

Expulsion du pétrole de la roche mère

Migration mélangée à eau vers le réservoir (sable, calcaire, récif)

Piégeage (majorité anticlinal) avec couverture (argile, marne, sel)

Préservation du champ, mais possibilité de dégradation par les bactéries et les eaux de surface donnant des **sables bitumineux** (fin de cycle).

Schistes bitumineux = roches mères immatures (début de cycle), nécessitant une pyrolyse vers 600°C pour obtenir du pétrole, classés dans les charbons (lignite). Ceux ne sont ni des schistes, ni du bitume!.

Caractéristiques des hydrocarbures (HC)

Les HC sont contenus (avec de l'eau) dans les pores des roches dites **réservoirs** et peuvent être produits si la roche est **poreuse** et **perméable** (pores connectés). Les paramètres essentiels du

réservoir sont la porosité, la perméabilité et la saturation en eau. Un champ de pétrole est habituellement une superposition de gaz, surmontant l'huile, surmontant l'aquifère. Le pétrole est caractérisé par sa densité, sa viscosité et sa teneur en soufre, mais en fait chaque brut a une composition différente.

Récupération

Une partie du pétrole dans les pores du réservoir d'un champ n'est pas déplaçable (problèmes de capillarité) et le taux de récupération par rapport au volume en place varie suivant les qualités du réservoir (configuration des pores) pour le pétrole de 3% (réservoir compact mais fracturé) à 85% (grande porosité et perméabilité = récif ou sable).

La moyenne du taux de récupération est autour de 45-50% pour le pétrole, alors qu'elle est de 75 à 80% pour le gaz.

La récupération primaire du pétrole se fait, dans des puits producteurs espacés, par expansion de l'huile et du gaz et par poussée de l'aquifère sous-jacent.

La récupération secondaire se fait en injectant dans des puits injecteurs de l'eau (plus bas) ou du gaz (plus haut).

La récupération tertiaire se fait par modification des caractères physiques de l'huile ou de l'eau (injection vapeur, solvant, ...). Elle ne représente que de l'ordre de 2% de la production actuelle.

Le pétrole est dit conventionnel ou non, avec des définitions diverses. Pour certains, c'est le pétrole difficile et cher. Pour d'autres c'est un état physique particulier du pétrole sans considération économique ou technique, quand le gisement n'a pas de contact défini HC-eau.

J. Dukes (Univ Massachusetts) a estimé en 2003 que la consommation annuelle de combustibles fossiles correspond à 400 fois la production primaire végétale et animale de la planète.

-2-2-Technologie

Étymologie : discours sur la technique, utilisé depuis plus d'une décennie à la place du mot "techniques" (pas dans votre DEA), alors que les techniques industrielles plafonnent.

Les économistes et les politiciens croient trop dans la technologie future (père Noël) et ne croient pas ce que disent les techniciens.

Les soi-disantes nouvelles technologies ont en fait plus de 20 ans (3D, puits horizontaux et à long départ).

Succès des dix dernières années en techniques:

- GPS en topographie
- puissance ordinateurs
- production sous-marine
- forage dirigé
- enregistrement des paramètres physiques durant le forage

Echecs des dix dernières années en techniques:

- perte sonde Mars climate orbiter: confusion système métrique
- bug Y2K: coût faramineux pour 2 chiffres manquants
- pas de bug Y2K: pour ceux qui n'ont rien fait
- le pouvoir de résolution de la sismique
- stockage des données: obsolescence des supports & des lecteurs

-2-3-Réserves, ressources, incertitude et probabilité, divulgation

-Confusion entre réserves et ressources:

Aux US dans le domaine de la finance:

-ressources = immédiatement disponible en espèces, comme le compte courant, l'épargne,
-réserves = immobilier, voitures et autres propriétés qui ne peuvent être réalisés immédiatement.

Au contraire pour le pétrole:

-réserves = production future avec les techniques et l'économie actuelles

-ressources = soit le volume contenu dans le sous-sol, soit le volume que l'on pourrait produire sans contrainte technique et économique des champs connus ou à découvrir.

La confusion est donc grande entre ces 2 termes, expliquant en partie les incompréhensions entre optimistes et pessimistes. L'autre partie est la source des données (politiques ou techniques).

-Approche de l'incertitude: déterministe ou probabiliste?

L'approche probabiliste est refusée par de nombreux acteurs de l'industrie pétrolière au profit de l'approche dite déterministe, car la plupart (notamment les Texans) ne savent pas manipuler les probabilités. Chaque champ est un cas particulier et les probabilités sont subjectives. Une bonne estimation dépend de l'expérience de l'auteur et de sa motivation à s'améliorer en pratiquant le post-mortem de ses estimations passées dès qu'il a les résultats.

-Calcul d'erreur

L'emploi d'ordinateurs permet d'obtenir de nombreuses décimales dans un calcul et la plupart des ingénieurs ne se donnent pas la peine de (ou ne savent pas) faire un calcul d'erreur. Comme toutes les données pétrolières ne sont pas fiables à moins de 10%, l'usage de plus de 3 chiffres significatifs (affirmant que la précision est de l'ordre de 1 pour mille) par un auteur montre son incompétence.

Erreurs très souvent rencontrées

-Addition de $A=1000$ et de $B = 1$ donne un total de **1001**.

Non, le total doit être donné comme **1000**, car l'item B est très inférieur à l'imprécision sur A (900 à 1100) et ne compte pas

-Conversion d'unité: Réserves de gaz = 100 G.m³ converties en 3,53 Tpc alors qu'il faut donner 4 Tpc (un seul chiffre significatif comme l'estimation originale)

-Propriété

Le pétrole (le sous-sol) appartient à l'Etat dans tous les pays du monde, sauf aux US où il appartient aux propriétaires du sol (particuliers ou état) et où il y a plus de 20 000 producteurs. Les données de réserves par champs sont confidentielles dans la plupart des pays, surtout le Moyen-Orient, l'ex-URSS, la France, mais pas la Grande-Bretagne, la Norvège et le fédéral américain qui donnent le détail actualisé par champs. Les réserves de pétrole par champ sont de nouveau un secret d'Etat depuis 2000 en Russie et divulguer les réserves est punissable de 7 ans de prison. Khodorkovsky aurait pu être mis en prison uniquement pour ce délit de divulgation des chiffres de réserves de Yukos!

-Publication de données:

Publier des données est un acte politique et dépend de l'image que l'auteur veut donner. Dans la fourchette d'incertitude, il choisit la valeur qui lui convient, minimum s'il veut paraître pauvre ou maximum s'il veut paraître riche.

Tout le monde ment (parfois par omission) ou triche plus ou moins:

-les membres de l'OPEP qui ne respectent pas les quotas (+10%)

-les compagnies pour maintenir leur action (et leurs dirigeants leur stock options): Enron, Worldcom, Xerox,

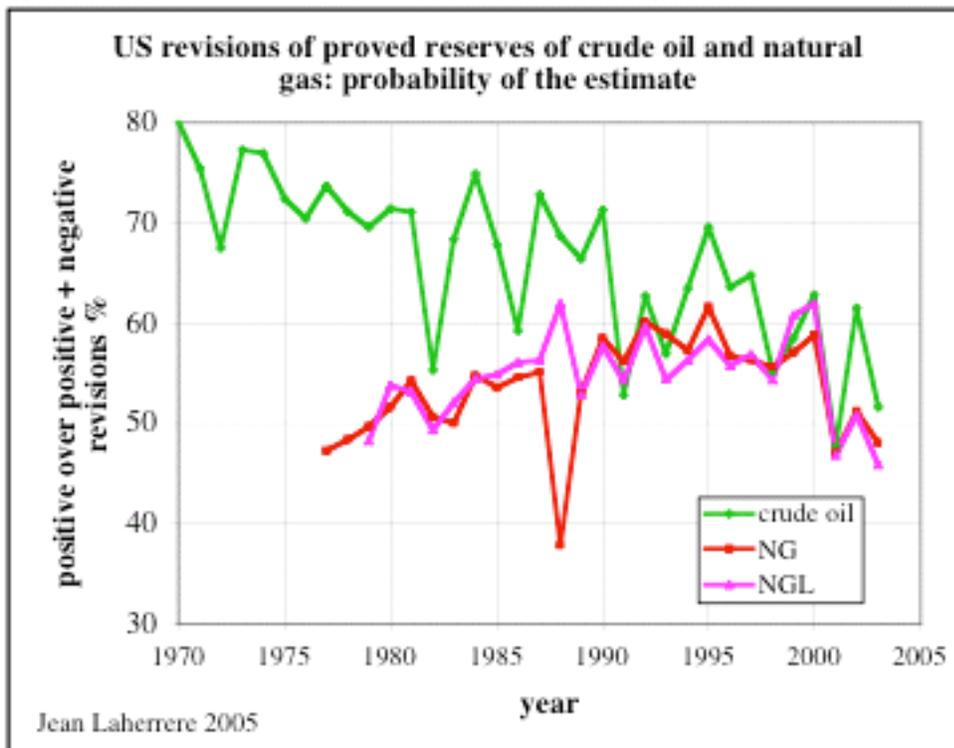
-les gouvernements sur le chiffre du PIB, chômage (50% pour l'Allemagne?), de l'immigration, de la population et de la croissance future

Les compagnies américaines doivent suivre les règles de la SEC (Security and Exchange Commission) qui n'autorise que la publication des réserves dites prouvées (données financières) et qui empêche de tenir compte des réserves probables qui sont prises en compte dans le reste du monde hors US (données techniques).

-L'incertitude est présentée comme une certitude pour la SEC

Les réserves sont incertaines, mais la plupart des définitions, comme les règles de la SEC (Securities and Exchange Commission), parlent de “certitude raisonnable” pour l'existence des réserves dites prouvées (supposées être le minimum) et refusent l'approche probabiliste à cause de l'aversion au risque des banquiers et des actionnaires. *Raisnable* en terme de probabilité peut varier de 51% à 99%. Il est ironique de trouver la même ambiguïté utilisée par la FDA (Food & Drug Administration) de “certitude raisonnable” pour ne pas causer de mal à la santé, lors de l'approbation d'un nouveau produit. Les derniers rapports annuels de l'USDOE montrent que les révisions négatives des réserves prouvées américaines sont aussi importantes que les révisions positives, montrant que la probabilité de l'estimation actuelle est proche de 50%, alors que les règles SPE/WPC (Society of Petroleum Engineers/World Petroleum Congress) demandent pour le prouvé une probabilité d'au moins 90%.

Figure 2-1: Probabilité de l'estimation des réserves prouvées aux US



Alors que le Canada admet depuis 2001 la publication des réserves probables, la SEC a des règles datant de plus de 25 ans qui sont périmées et contraires à la pratique du reste du monde. La SEC oblige les compagnies à ne pas publier ni les projets non signés ni les réserves probables, de façon à

obtenir des valeurs minimum qui dans le futur feront l'objet de croissance pour satisfaire banquiers et actionnaires. Les réserves prouvées des champs sont additionnées pour obtenir la valeur dite prouvée du pays, alors que cette addition n'est pas correcte (il faut faire une simulation dite de Monte-Carlo tenant compte des probabilités) car elle sous-estime le total, conduisant à une croissance supplémentaire. Seules les valeurs espérées des champs peuvent être additionnées pour obtenir la valeur espérée du pays. Ces règles SEC devraient être changées, mais l'industrie américaine n'aime pas s'aligner sur le reste du monde (exemple système métrique ou carte de crédit avec puce).

En ex-URSS, les réserves sont grossièrement exagérées en raison d'une classification spéciale définie en 1979 qui prend la récupération théorique maximale, tout à l'opposé des règles américaines. Les Russes ont demandé aux Nations Unies de sortir de nouvelles définitions mondiales des réserves pour les hydrocarbures, le charbon et l'uranium, mais les NU ont sorti un très mauvais compromis («*United Nations framework classification for energy and mineral resources*» du 26 avril 2004) qui, voulant satisfaire tous les pays, a conservé les termes du passé sous un habillage moderne. Ils ont massacré l'approche probabiliste (la moyenne, le plus probable et la médiane sont tous considérés être la meilleure estimation). Leur proposition est en réalité ignorée par tous, comme la précédente de 1997. J'ai été membre de la force de travail sur les réserves SPE/WPC 1997 et la précédente classification NU 1997 n'était pas prise en considération. Dans le reste du monde hors US et ex-URSS, les réserves sont **prouvées plus probables** 2P suivant les règles SPE/WPC et sont proches de la valeur espérée qui, statistiquement, ne devra pas croître. Individuellement un champ pourra voir ses réserves augmenter ou diminuer mais dans l'ensemble le total des champs ne changera guère.

Dans les pays OPEP du Moyen-Orient, les réserves officielles dites «prouvées» déterminent les quotas. Elles ont augmenté de 300 Gb de 1985 à 1990, alors que les vraies découvertes n'ont été que de 10 Gb, en raison de la bagarre sur les quotas entre les membres de l'OPEP en face du contre-choc de 1985. Ces pays trichent aussi sur le montant de leur production, car ils ne respectent pas les quotas.

Des compagnies d'espionnage vendent très cher les données mondiales réelles: Petrologistics pour la quantité de pétrole transportée sur mer; IHS (ex Petroconsultants) ou Wood Mackenzie (WM) pour les réserves et production des champs du monde hors USA.

Une enquête mondiale pour obtenir les réserves restantes par pays à la fin de l'année (en fait le premier janvier de l'année suivante) auprès des gouvernements est publiée par Oil & Gas Journal (OGJ) avant la fin de l'année, c'est-à-dire avant que toute étude technique ne soit faite. Elle montre l'incohérence des données officielles, avec l'absence fréquente de changement des réserves surtout pour les membres de l'OPEP. Fin 2004, 83 pays sur 105 n'ont pas changé leurs chiffres de réserves de pétrole par rapport à fin 2003, comme si leur production annuelle était exactement égale aux réserves ajoutées dans l'année. C'est une farce! Mais ces données politiques sont officielles et les seules publiées, donc utilisées par les économistes. Les chiffres des réserves prouvées mondiales à fin 2004 sont ridiculement précis alors même qu'ils divergent parfois fortement.

Donner plus de 2 chiffres significatifs pour des données pétrolières montre l'incompétence des auteurs, puisque le 2^e chiffre est différent, les suivants sont donc inutiles!

On doit toujours adapter le nombre de chiffres significatifs à la précision des mesures.

Les réserves restantes mondiales sont reportées à partir des données politiques par:

fin 2004	pétrole Gb	gaz Tcf
BP Statistical Review	1 188,555 694 069 4	6 337,364 557 3

Oil & Gas Journal OGI	1 277,701 992	6 040,208
World Oil WO	1 082,333 0	6 994,298 4
Cedigaz		6 358,575

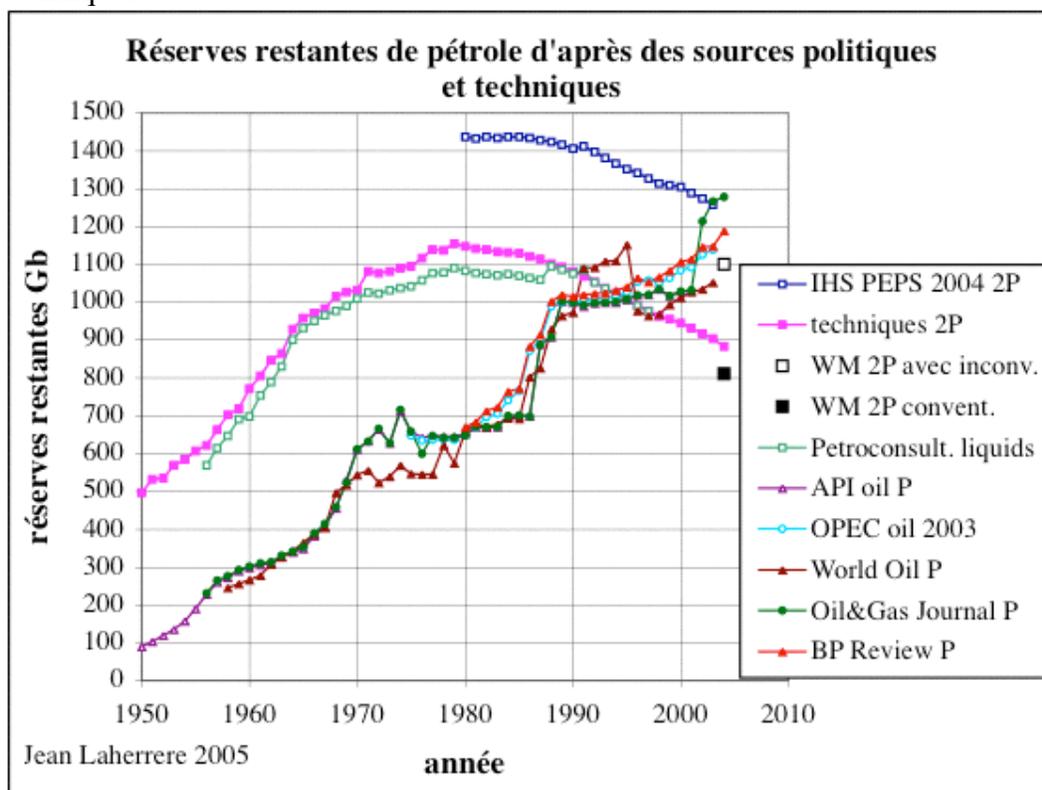
Les données techniques par champ sont confidentielles et ne sont disponibles que par des compagnies d'espionnage industriel. Heureusement, j'y ai accès pour toutes les données par champ hors USA (>25 000 champs) et pour les champs majeurs aux USA, mais elles sont hétérogènes entre USA, Canada, ex-URSS et le reste du monde pour les raisons méthodologiques expliquées ci avant. Je corrige ces données actuelles pour les ramener à la valeur moyenne (espérée) à la date de découverte (backdating), en tenant compte des sources différentes. C'est ainsi que j'arrive à 2000 Gb de réserves ultimes pour le pétrole brut excluant l'extra-lourd. Ce sont les données techniques qui, analysées en termes de réserves restantes, ont culminé en 1980! Les réserves d'extra-lourd ont peu changé depuis 1970 (Salvador 2005)

Les réserves politiques sont les réserves prouvées courantes où les révisions des découvertes passées sont reportées à l'année de révision, donnant une idée fautive du passé, car elles montrent une croissance continue depuis plus de 50 ans.

L'objectif des réserves prouvées est de fournir de la croissance, chère aux dirigeants. Nous sommes appelés pessimistes par les économistes en utilisant ces données techniques qu'ils n'ont pas.

Pour Claire Booth Luce: *The difference between an optimist and a pessimist is that the pessimist is usually better informed.*

Figure 2-2: Réserves restantes mondiales de pétrole conventionnel d'après des sources politiques et techniques



-Estimation des Réserves Ultimes

Les réserves ultimes, à savoir la quantité ultime qui sera produite à la fin de l'exploitation, peuvent être estimées de plusieurs façons:

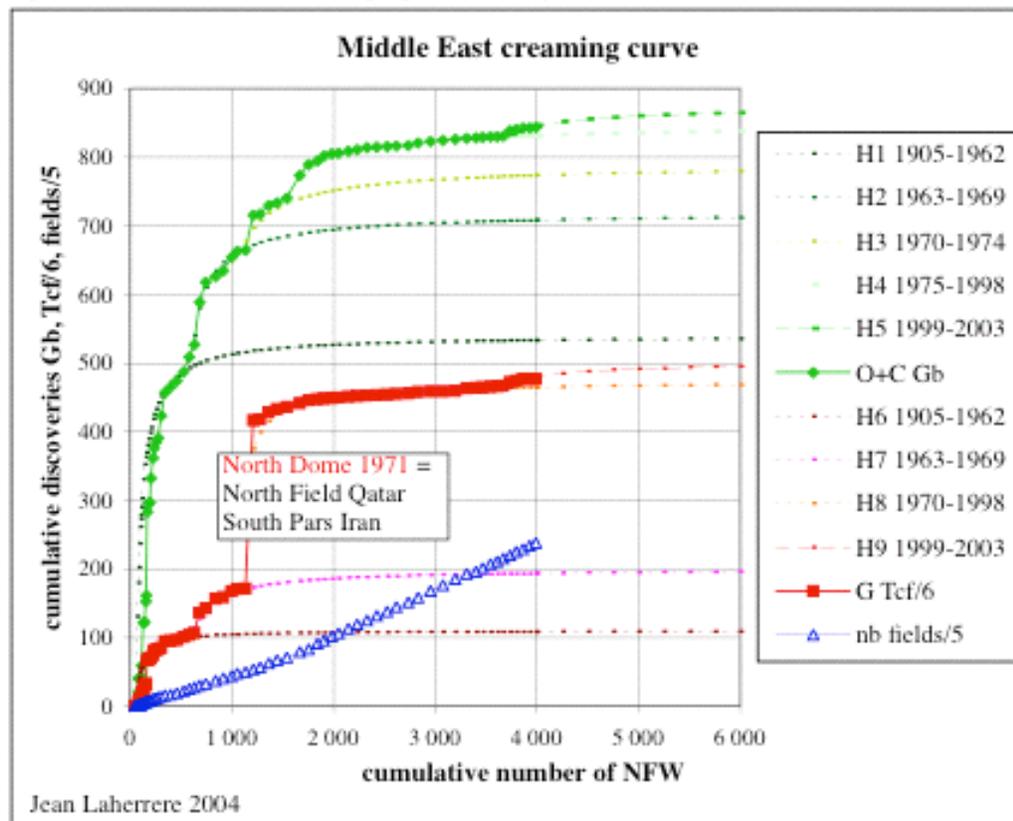
- courbes d'écrémage des découvertes cumulées versus nombre cumulé de forages d'explorations
- courbes du pourcentage annuel/cumulé versus cumulé pour la production et les découvertes
- corrélations production et découvertes décalées

-Courbes d'écrémage:

La courbe des découvertes cumulées en fonction du nombre cumulé de puits d'exploration (appelés new field wildcats = NFW) permet de s'affranchir des aléas temporels du stop and go de l'exploration au cours du temps. Cette courbe est toujours facilement modélisée avec plusieurs hyperboles et l'extrapolation de la dernière hyperbole permet d'avoir la valeur ultime s'il n'y a pas de nouveau cycle. Cette forme d'hyperbole correspond à la loi bien connue du rendement décroissant de l'exploration minière.

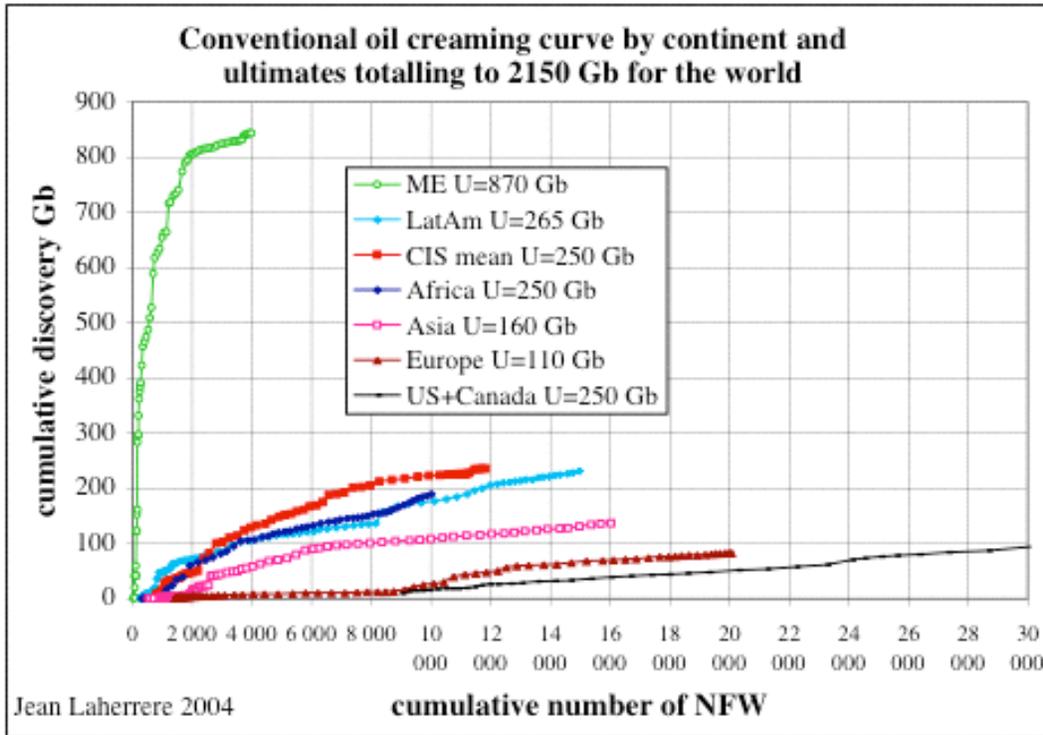
Pour le Moyen Orient, on voit que, cette région est mature avec une efficacité décroissante, les quantités à découvrir ne sont pas très importantes par rapport à ce qui a été déjà découvert. Il est évident sur cette courbe que le Moyen-Orient n'est pas sous exploré, contrairement à ce qui est souvent affirmé par les économistes !

Figure 2-3: courbe d'écrémage pour le Moyen-Orient



Les courbes d'écrémage par continent et leurs ultimes montrent une inégalité considérable. Les découvertes cumulées aux US et Canada ont nécessité 400 000 NFW, contre 20 000 NFW en Europe et 4 000 NFW au Moyen-Orient

Figure 2,4: Courbe d'écrémage du pétrole conventionnel par continent et ultimes

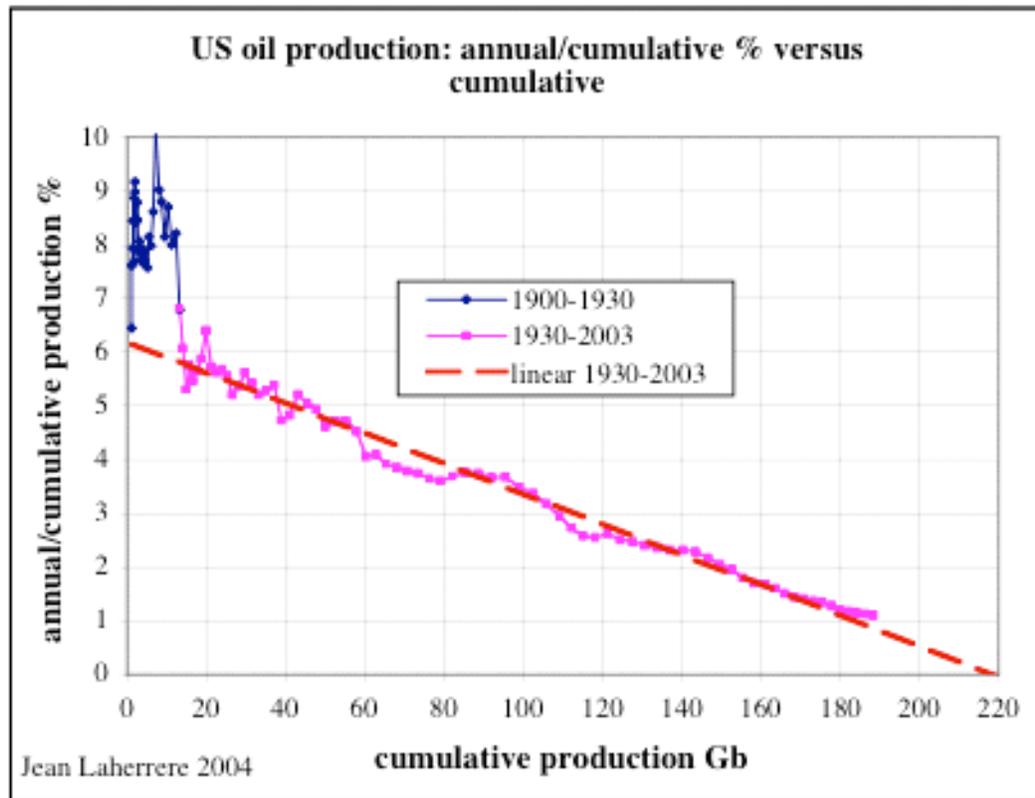


L'asymptote du modèle hyperbolique donne les réserves ultimes. En fait, on choisit la valeur correspondant à un cumul de puits d'exploration double de l'actuel. Ces estimations sont faites à partir des données IHS, mais les données WM conduisent à des estimations plus basses comme l'indique la figure 2. La valeur ultime mondiale des réserves de pétrole brut (excluant seulement le pétrole extra-lourd) est estimée à 2000 Gb. Ce chiffre rond indique bien l'incertitude de cette estimation.

Extrapolation de la courbe % annuel/cumulé versus cumulé

La courbe % annuel/cumulé versus cumulé pour la production des US peut être extrapolée sur la période 1930-2003 vers une valeur ultime de 220 Gb.

Figure 2-5: Extrapolation 1930-2003 pour les US: ultime pétrole = 220 Gb



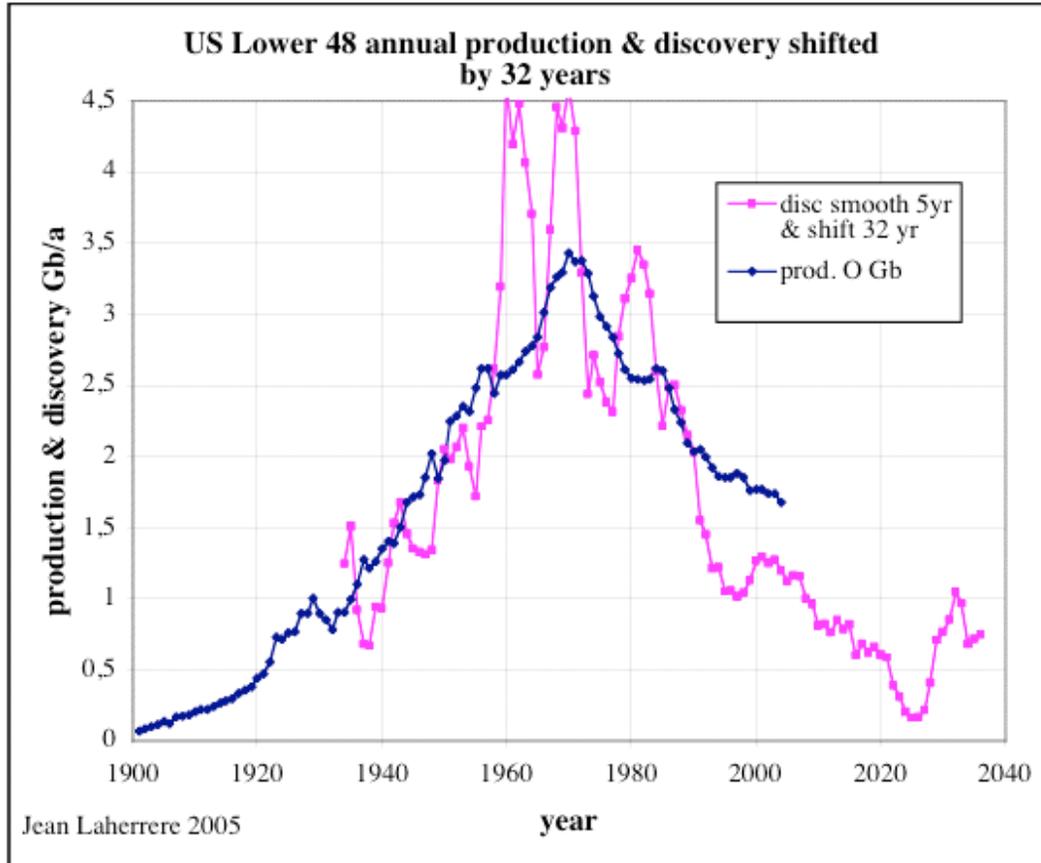
Le rapport USGS (Geological Survey) 2000 estime un ultime de 330 Gb! Mais ce rapport est l'estimation à fin 1995, soit vieux de près de 10 ans et périmé !

Découverte et production annuelles et prévisions

Les découvertes annuelles sont comparées aux productions annuelles après un certain décalage.

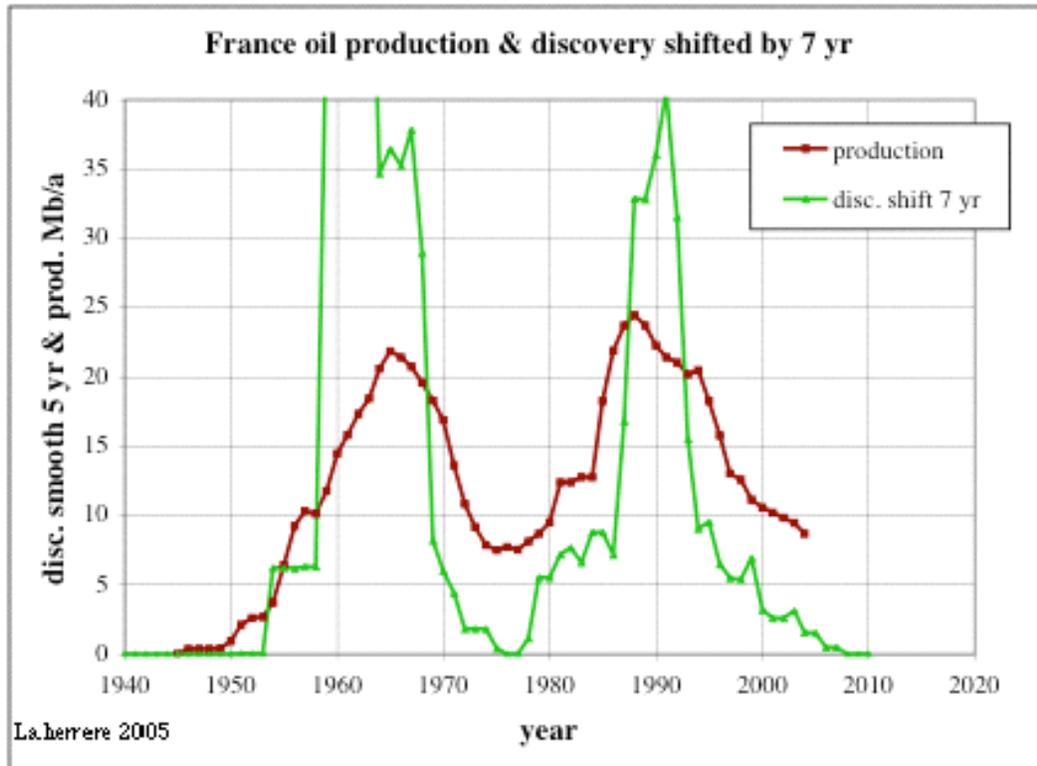
La corrélation de la production annuelle de brut des EU hors Alaska avec la courbe des découvertes (espérées ramenées à l'année de découverte) est très bonne pour un décalage de 32 ans.

Figure 2-6: Production EU hors Alaska et découverte *moyenne* décalée de 32 ans



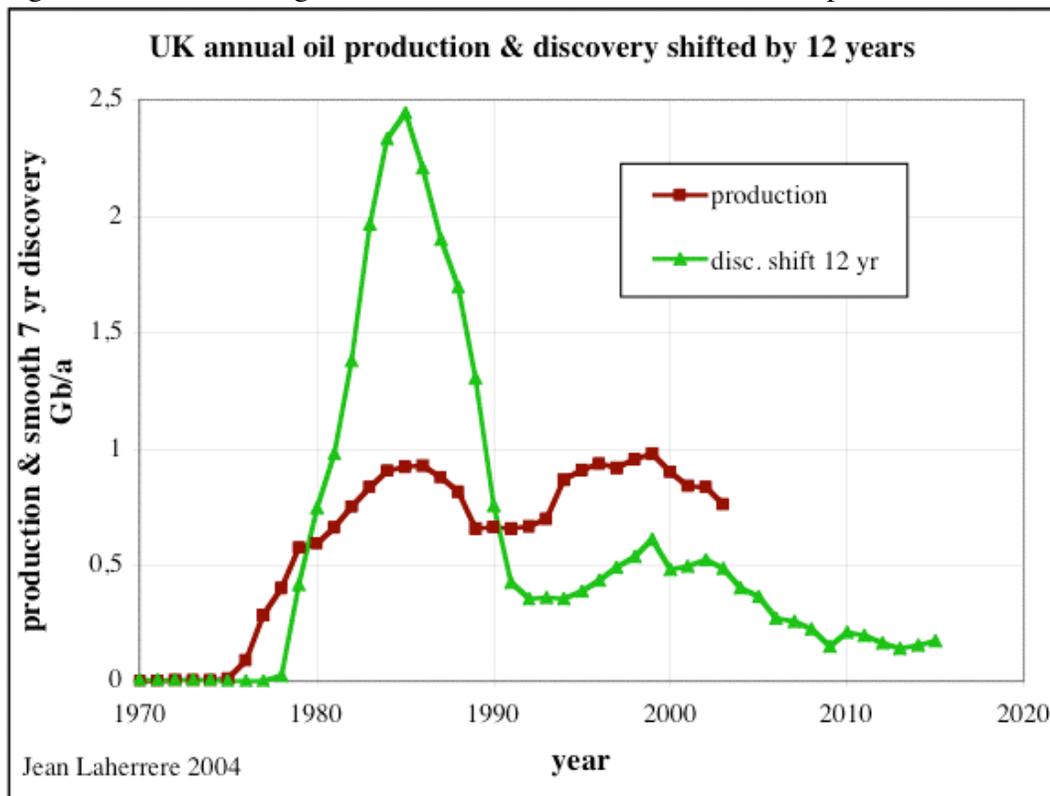
Pour les EU hors Alaska il n'y a qu'un cycle (très grand nombre de producteurs = mouvement brownien!), mais en France il y a deux cycles de découverte et deux cycles de production.

Figure 2-7: Production de pétrole en France et découverte décalée de 7 ans (en fait 10 ans pour le 1^{er} cycle et 5 ans pour le 2^e)



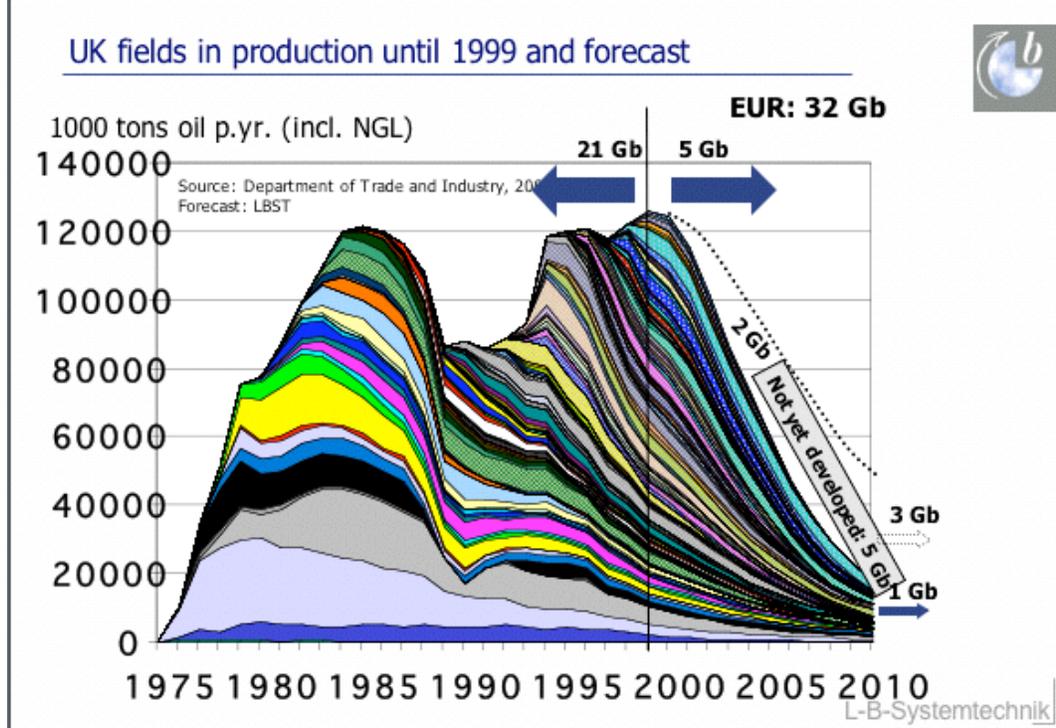
Il en est de même en Angleterre où les 2 cycles de production corrént avec les 2 cycles de découvertes après un décalage de 12 ans.

Figure 2-8: RU: décalage de 12 ans entre découverte annuelle et production



Le graphique production détaillé par champs montre que le creux de 1990 est dû aussi au manque de nouveaux développements importants (redémarrage par une nouvelle fiscalité) et au creux de Brent et Piper (préparation arrivée du gaz; explosion)

Figure 2-9: RU: production de pétrole avec le détail par champ : W. Zittel & J. Schlinder 2003



Russie

Pour la production en Russie, il faut se raccorder aux données de l'ex-URSS pour remonter à 1950, il y a eu un premier pic en 1988 et un 2^e inférieur qui va avoir lieu sous peu. Il est intéressant de comparer aussi avec les US. Les prévisions de CERA (Cambridge Energy Research Associates) 2005 sont très optimistes, sans pic avant 2020! plus optimiste que l'USDOE.

Ma prévision pour la Russie avec un ultime de 200 Gb est un pic imminent autour de 9 Mb/d, proche de celui de Ray Leonard ex VP E&P Yukos (ASPO 2005).

Figure 2-10: prévisions de production annuelle de pétrole aux US, ex-URSS et Russie pour des ultimes de 230 Gb, 250 Gb et 200 Gb ainsi que celles de USDOE, Leonard (Yukos) et CERA

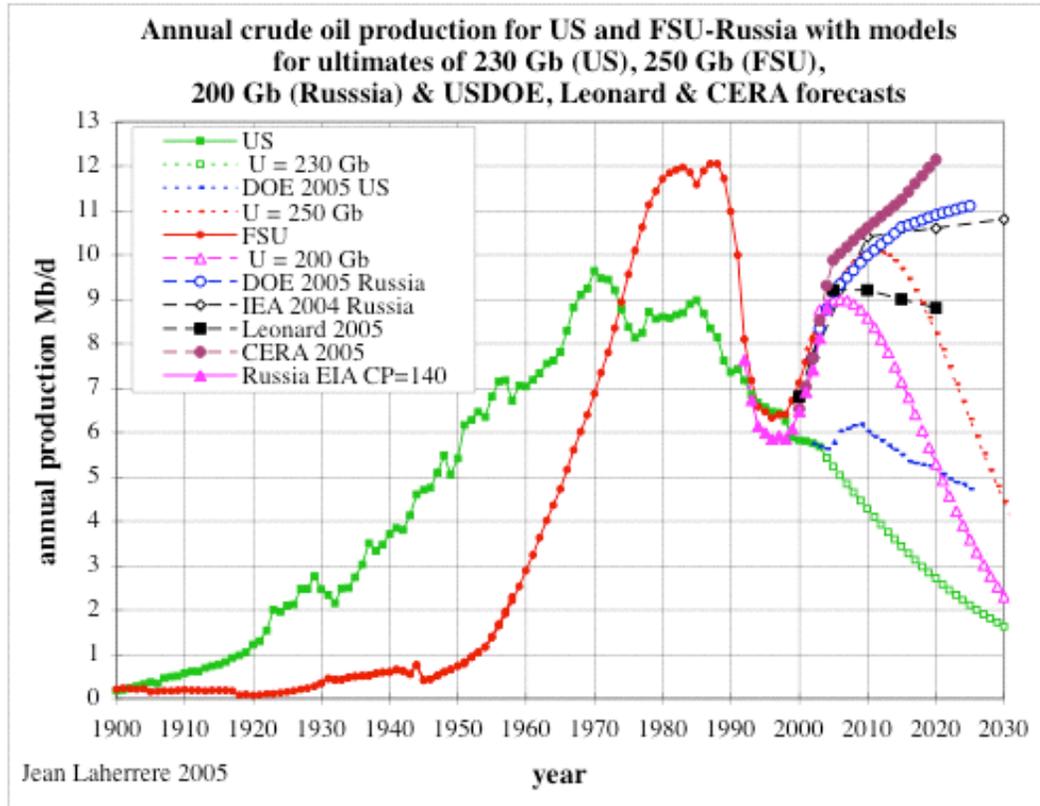
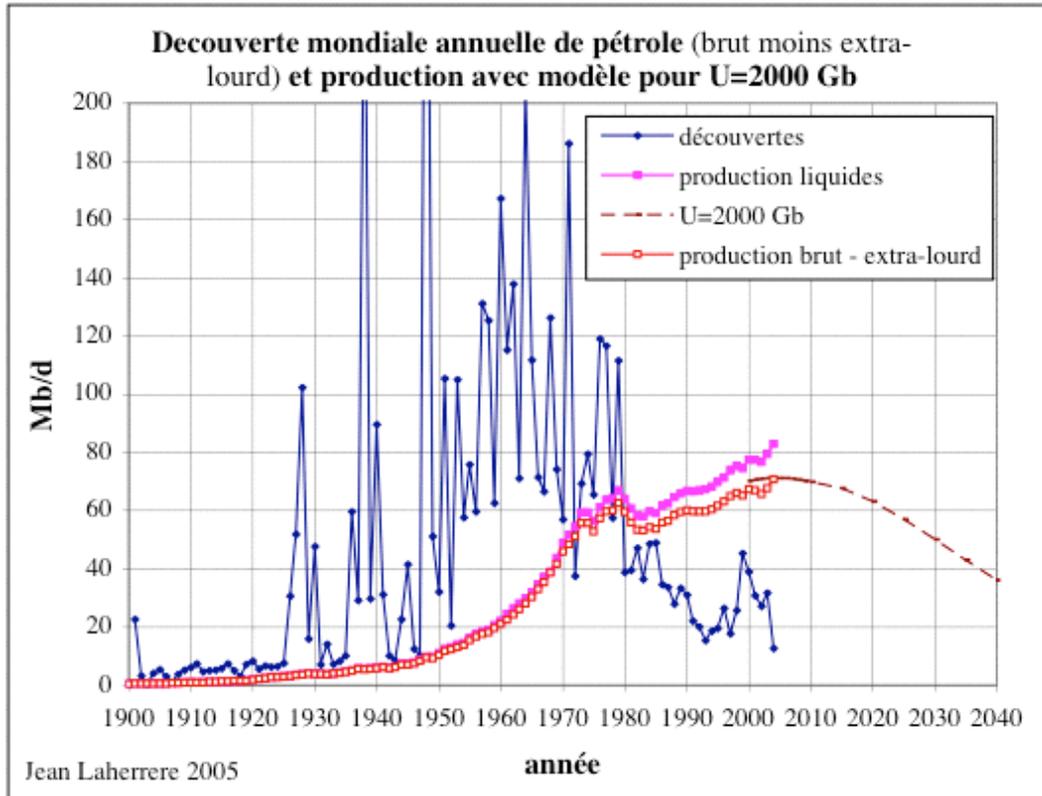


Figure 2-11: Découverte et production annuelle mondiale de pétrole conventionnel avec modèle (courbe d'Hubbert) pour un ultime de 2000 Gb (surface sous la courbe)

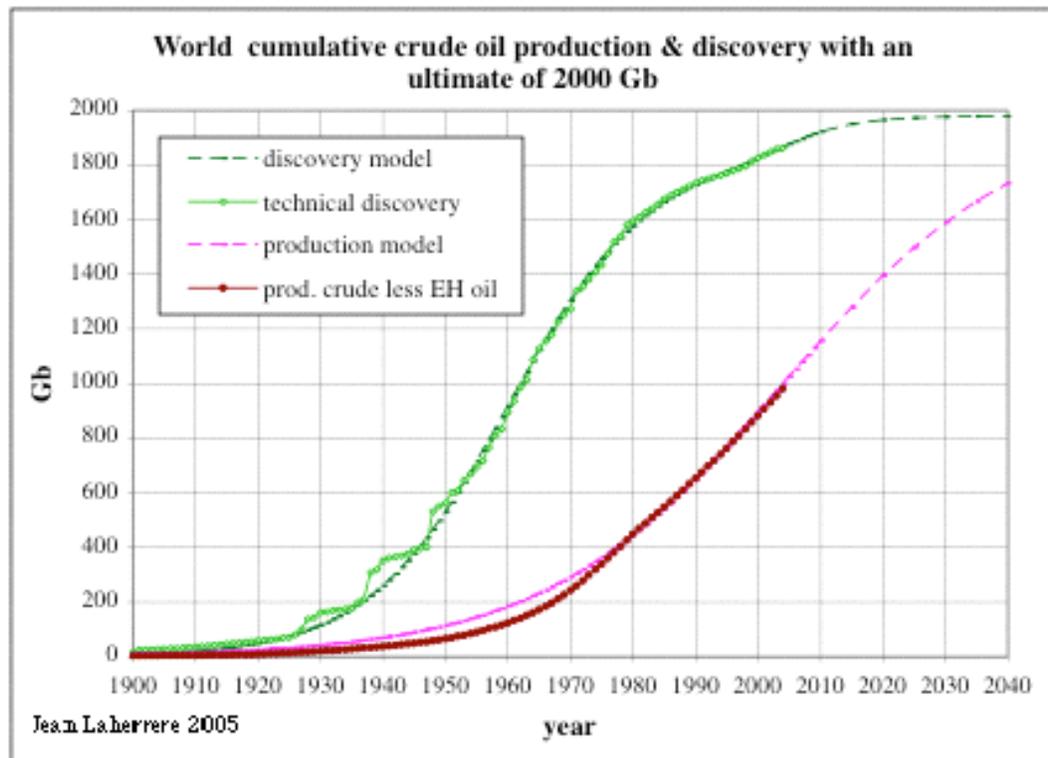


Depuis 1980, la production annuelle de pétrole est environ le double des découvertes (voir le site de Chevron www.willyoujoinus.com). Les réserves restantes de pétrole conventionnel diminuent donc depuis 1980. Le pétrole extra-lourd est essentiellement les sables bitumineux du Canada (Athabasca connus depuis 250 ans et dont le premier pilote date de 1930) et les huiles extra-lourdes (aussi lourdes, mais moins visqueuses car plus chaudes) du Venezuela (Orénoque) découvertes depuis 1936.

Découvertes et productions cumulées

Les quantités cumulées sont plus faciles à modéliser, notamment avec des courbes dites en S ou logistiques (croissance rapide suivie d'une décroissance rapide et stabilisation à une valeur asymptotique).

Figure 2-12: découverte et production mondiale cumulé de pétrole (brut moins extra-lourd)



-2-4-Prévisions pétrolières

Prévisions des medias utilisant le nombre d'années des réserves restantes en fonction de la production actuelle (R/P)

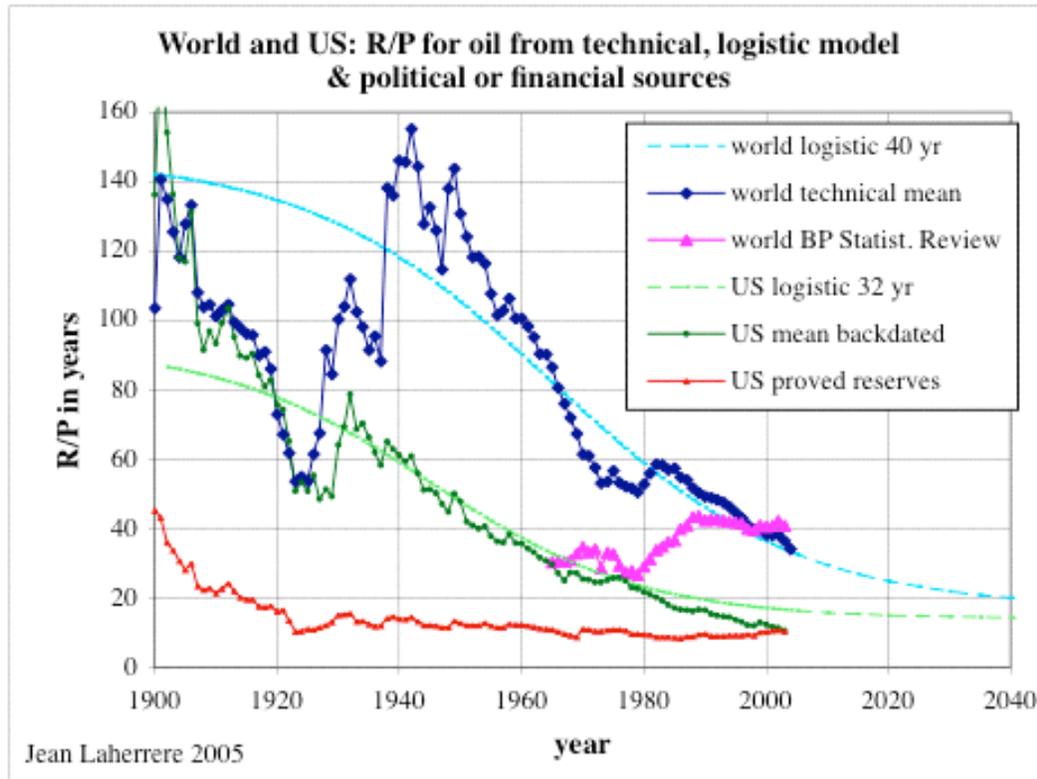
L'un des paramètres les plus utilisés par les médias est le nombre d'années de réserves restantes en production actuelle. Il est ainsi publié qu'il reste 40 ans pour le pétrole mondial, suggérant que la production actuelle peut être maintenue à ce niveau pendant 40 ans. Les économistes estiment donc que "Tout va très bien Madame la marquise" puisque qu'il y a encore pour 40 ans de production de pétrole.

Mais en même temps les organismes officiels admettent que la demande va croître sur les 30 prochaines années ce qui implique, ipso facto, la croissance de la production. En outre, les lois physiques ne peuvent permettre de garder une production constante pendant 40 ans, puis qu'elle s'écroule à zéro la 41e année. La production d'un puits décline très vite après une montée à la pression initiale, en fonction de la chute de pression. La production d'un champ monte jusqu'à un plateau en fonction du nombre de puits et de la contrainte de débit, puis chute plus ou moins suivant les injections d'eau et de gaz. La production d'un pays monte et décline en fonction du potentiel des champs, du nombre de champs développés, des investissements et des contraintes politiques. Les réserves prouvées américaines donnent un R/P d'environ 10 ans depuis 80 ans, montrant bien que ce ratio n'a aucun sens en prévision, même si les réserves sont souvent estimées (même par l'USGS) en prenant la règle pratique (*rule of thumb*) de multiplier par 10 la production annuelle! Si on prend, non pas les données politiques ou financières, mais les données techniques pour le monde, le R/P était de 140 ans en 1900, il est descendu à 50 ans en 1925, pour remonter à 150 ans en 1945 et être actuellement à 35 ans. Si la production cumulée suit une courbe logistique identique à celle des découvertes cumulées mais décalée de 40 ans (voir figure 10) le R/P de ce modèle tend vers 17 ans (en fait le cinquième de la demi largeur du cycle de la logistique). Pour les EU, le R/P

technique était de 160 ans en 1900 pour décliner lentement (sauf en 1930) à 10 ans (les réserves offshore profond sont peut-être sous-évaluées), mais il restera à ce niveau jusqu'à épuisement total, car le modèle logistique tend vers une asymptote à 15 ans! En fait les producteurs américains avaient découvert il y a très longtemps que le R/P tendait vers un chiffre constant jusqu'à épuisement!

R/P est donc un très mauvais paramètre pour prévoir le futur, mais il est utilisé par tous!

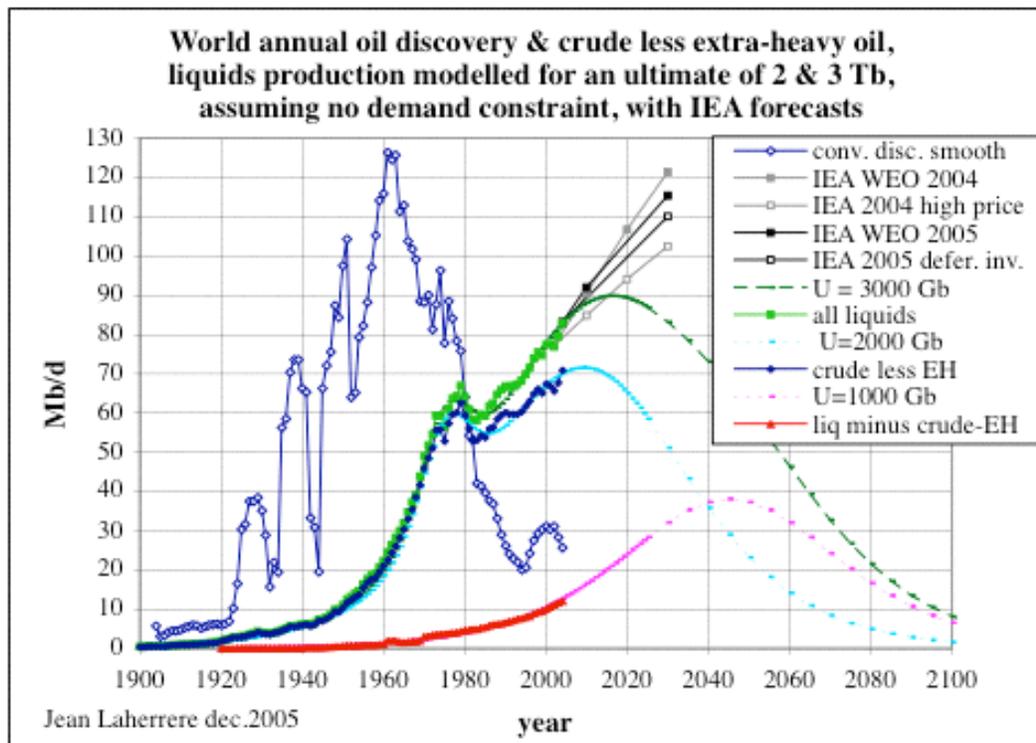
Figure 2-13: R/P (monde et EU) en années pour le pétrole d'après les sources financières ou politiques et les sources techniques avec modèle logistique



Prévisions pour la production de liquides

On s'aperçoit que ce qui reste à découvrir représente moins de 150 Gb, c'est-à-dire moins que l'imprécision de ce qui a été déjà découvert. Mais le pétrole conventionnel n'est qu'une grosse partie de la demande de liquides. Il y a en outre les condensats, les liquides de gaz naturel, le pétrole synthétique (sables bitumineux, pétroles extra-lourds, biomasse, gaz, charbon), et les gains en volumes des raffineries. Après plus de 10 ans de travail, ma dernière estimation des réserves ultimes peut être résumée par ces chiffres simples et arrondis pour montrer l'incertitude: 2000 Gb pour le brut hors extra-lourd, 500 Gb pour l'extra lourd, 250 Gb pour les liquides de gaz et 250 Gb pour le pétrole synthétique (à partir de matière organique, charbon, gaz ou biomasse, c'est à dire le soleil, eau et CO2) et les gains de raffinerie.

Figure 2-14: Découverte de pétrole et prévision de production mondiale de liquides (sans contrainte de demande) pour un ultime de 3 Tb (Campbell ASPO utilise un ultime de 2,4 Tb) avec prévisions AIE 2004 (25 \$2004/b et 35 \$/b en 2030) et AIE 2005 (39 \$2004/b et 52 \$/b en 2030)



Colin Campbell dans son ASPO Newsletter d'octobre prédit un pic des liquides pour 2010 pour un ultime de 2,4 Tb mais, dans ses «autres» liquides, il ne met que les liquides de gaz, excluant les pétroles synthétiques et les gains de raffinerie (d'où ses chiffres de 80 Mb/d en 2004 et 74 Mb/d en 2000). Son modèle ne correspond pas au chiffre de la demande publié par l'USDOE (source publique la plus complète) qui comprend tous les liquides (83 Mb/d en 2004).

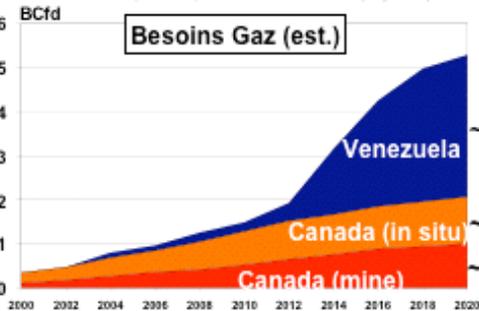
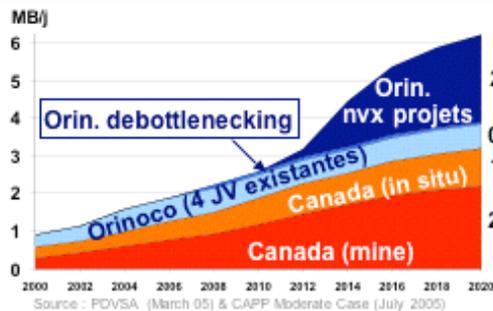
Le pic que peut offrir l'offre se situe dans la prochaine décennie s'il n'y a pas de contrainte de la demande. **S'il y a chute de la demande (prix élevés ou dépression économique) il y aura un plateau en tôle ondulée (oscillation chaotique des prix et de la demande).** Les prévisions de l'AIE sont différentes car elles n'ont pour but que de satisfaire les objectifs politiques des pays qui ont pour but la croissance. Les prévisions AIE (WEO) ont peu varié de 2004 à 2005 pour le volume en 2030 (115 au lieu de 120 Mb/d) alors que nous prévoyons 80 Mb/d et les prix 2030 sont passés en \$2004/b de 25 à 39 pour la référence et de 35 à 52!

-Pétrole non-conventionnel

Dans le graphique précédent le pétrole non-conventionnel (extra-lourd et synthétique) est groupé avec les liquides de gaz et les gains de raffinerie. La production est de 12 Mb/d en 2004 et le modèle avec un ultime de 1 Gb prévoit 25 Mb/d en 2020 soit 13 Mb/d d'augmentation, ce qui est important et supérieur à ce que prévoyent d'autres experts. Nous ne sommes donc pas pessimistes ! Total (Préel 2005) prévoit une augmentation du brut extra-lourd de 5 Mb/d de 2004 à 2020, qu'il estime forte. Il signale les besoins considérables de gaz pour fournir de la chaleur.

Figure 2-15: Production de brut extra-lourd par Total 2002-2020

Bruts Lourds : une forte croissance attendue mais qui est tributaire des investissements qui pourront être réalisés



5% de la production mondiale en 2020 ?

- ~2,5 Mb/j (2010), 4 Mb/j (2015), 6Mb/j (2020)
- Dépendra du rythme auquel les développements pourront être lancés

Constat

- Des coûts techniques acceptables
- Des besoins de gaz considérables
 - 2 Bcf/d (20 Gm3/an) au Canada en 2020
 - 3 Bcf/d au Venezuela si schémas chauds
- et de difficiles questions d'environnement : CO₂, eau, restitution des sites...
- Un enjeu technologique majeur
 - Progrès sur le technologies existantes
 - Développement du SAGD, ...

Un jeu pour les Majors

- Complexité technologique et business
- Intégration au raffinage
- Énormes investissements

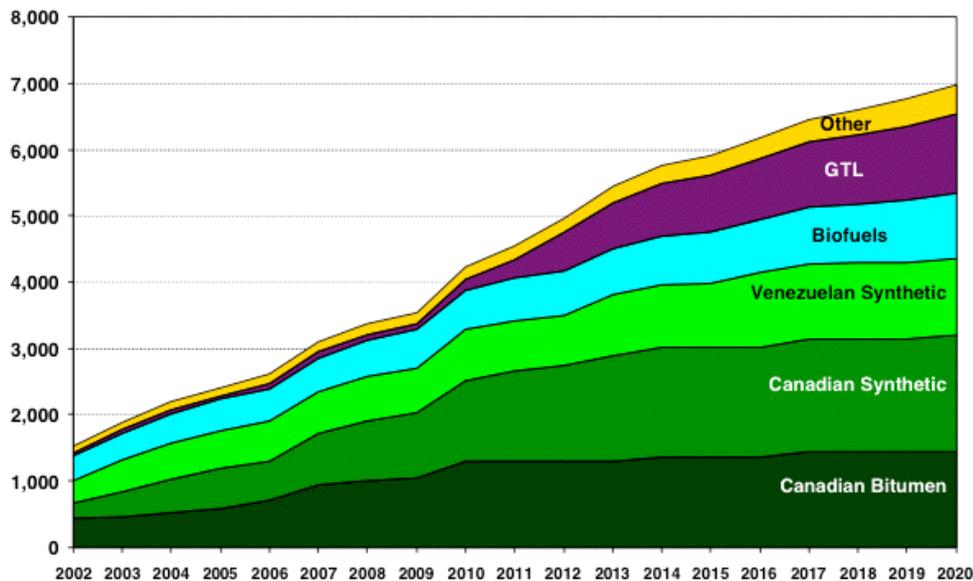


Journées du Pétrole
Paris – 12 & 13 octobre 2005

8

Oxford Institute for Energy Studies (Skinner & Arnott 2005) prévoit une augmentation seulement de 3 Mb/d pour l'extra-lourd de 2004 à 2020 et de 5 Mb/d en ajoutant les biofuels et GTL.
Figure 2-15: Production de pétrole non-conventionnel par OIES 2002-2020

Figure 23: Total unconventional oil supply 2000-2020



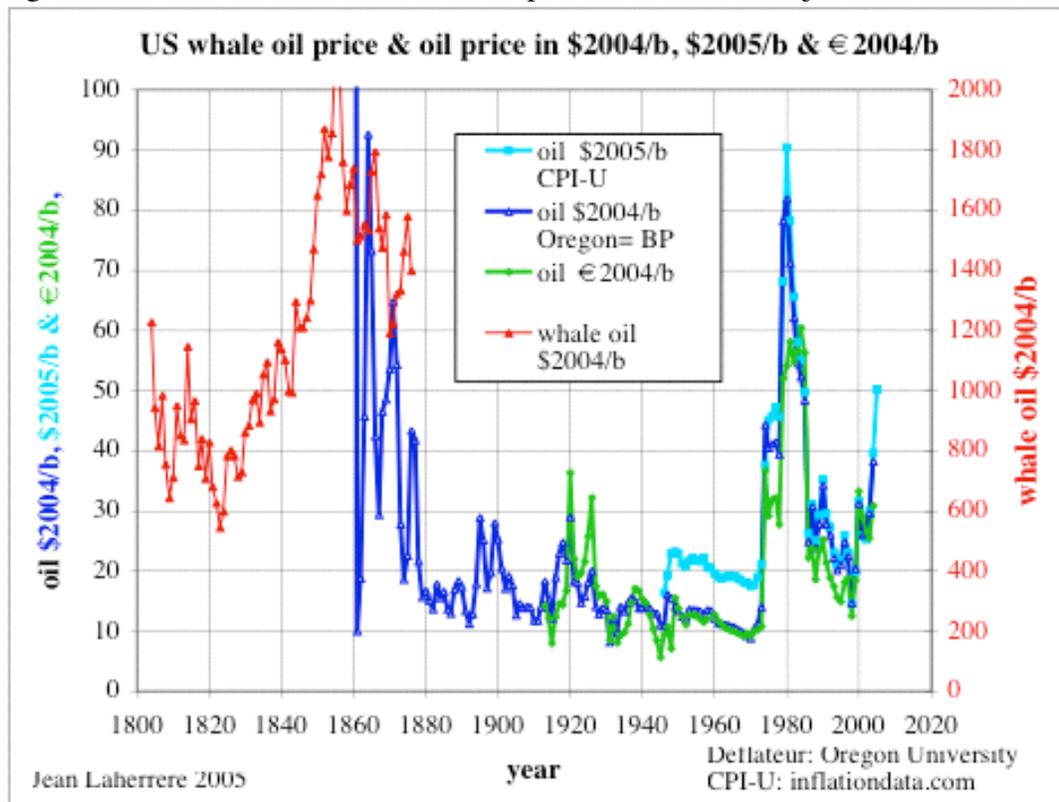
Source: OIES estimates.

-Prix du brut

Il est intéressant de comparer le prix de l'huile de baleine aux EU avec celui du pétrole en dollar et euro d'aujourd'hui. Son prix a culminé en 1855 à 2000 \$/b (valeur 2004). En 1875 ce prix était 30 fois plus élevé que celui du pétrole.

On peut noter que le déclenchement de l'exploration et production pétrolière à un stade industriel est bien corrélé à la raréfaction des baleines qui a entraîné la montée du prix de leur huile. Les investisseurs qui ont financé le « Colonel » Drake en 1859 étaient donc fortement motivés économiquement. Ensuite par le double jeu de la baisse de la demande en raison des prix élevés et l'augmentation de la substitution, le prix de l'huile de baleine a décliné.

Figure 2-17: Prix l'huile de baleine et du pétrole en \$ et € d'aujourd'hui 1800-2004

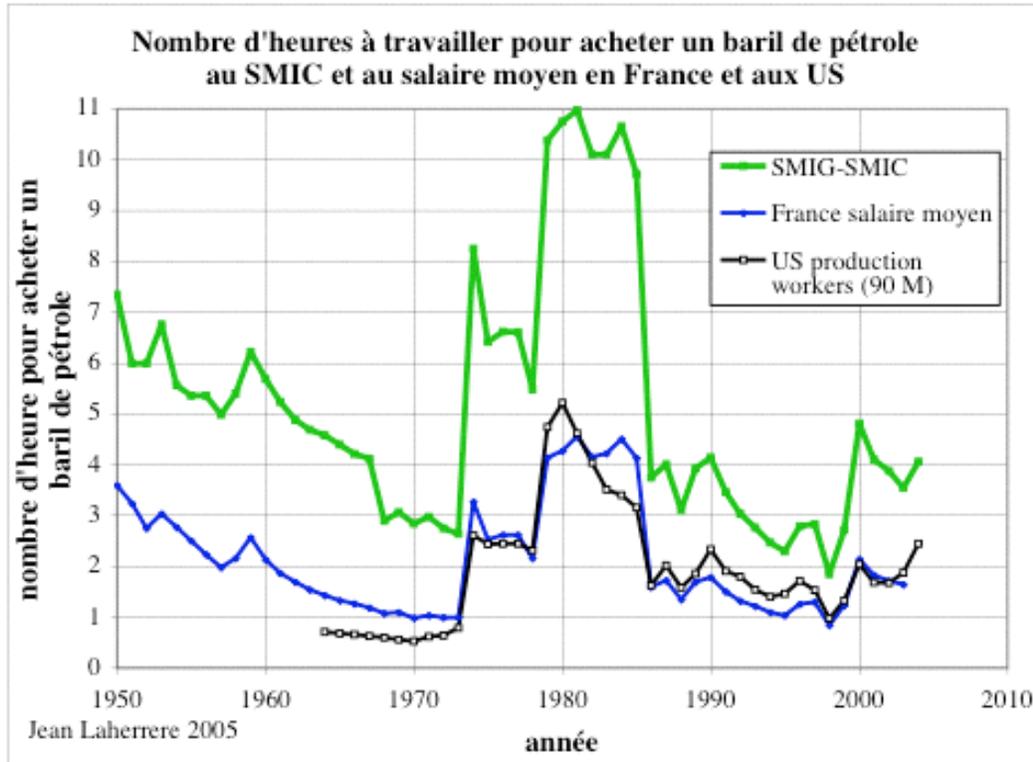


Le prix du pétrole varie suivant sa qualité, car chaque brut d'un champ est différent. Parmi les bruts les plus souvent cotés il y a le panier OPEP, l'Arabian light, le Dubai, le Brent, le WTI (West Texas Intermediate). Il est amusant de voir que ces trois derniers bruts vont bientôt disparaître avec la fin prochaine des champs!

Le prix du pétrole a varié avec les grandes découvertes et les grands événements politiques. En prenant en compte l'inflation, il arrive tout juste aux sommets atteints au début de son histoire ou en 1980! En fait, même s'il semble élevé aujourd'hui, c'est peu de chose par rapport à 1980 exprimé en heures de travail. En France, pour acheter un baril de brut, il fallait travailler au SMIC 7 heures en 1950, 3 heures en 1973, 11 heures en 1980, 2 heures en 1998 et que 4 heures en 2004 (40 \$/b) soit 2,5 fois moins qu'en 1980! Au salaire moyen horaire, il ne faut pas plus travailler en France qu'aux US mais les Français travaillent 1600 heures contre 2000 pour les Américains!

Le prix du baril doit être de 100\$/b pour travailler autant qu'en 1980

Figure 2-18: Nombre d'heures de travail pour acheter un baril de pétrole au SMIC ou au salaire moyen France et US

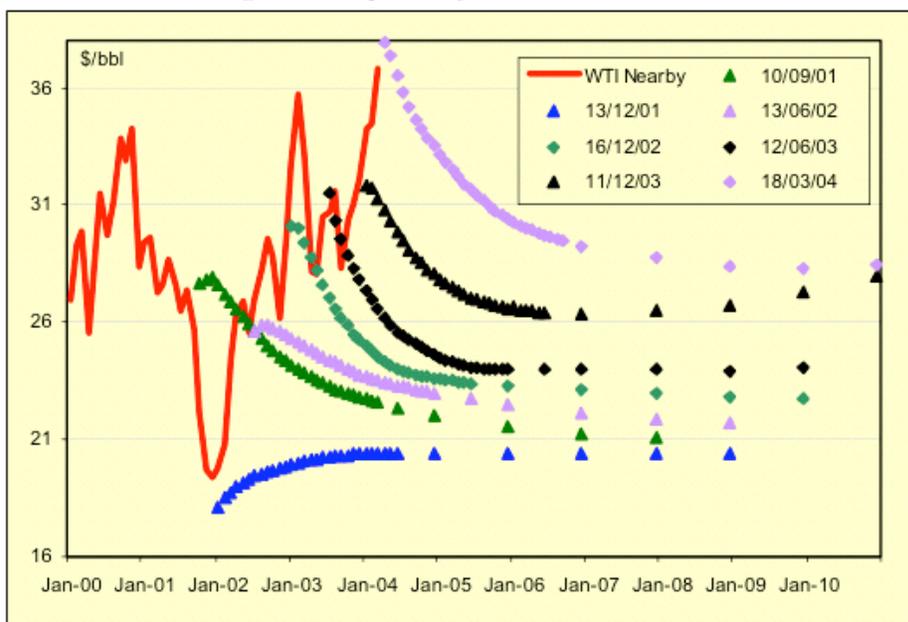


Je me refuse à faire des prévisions sur les prix car le comportement des consommateurs et des acheteurs est trop irrationnel.

Les prévisions du prix du pétrole sont toujours fausses.

Figure 2-19: Prévisions du prix du pétrole 2000-2004 comparées à la réalité d'après CGES

Figure 1: Oil prices & forward curves 2000-04



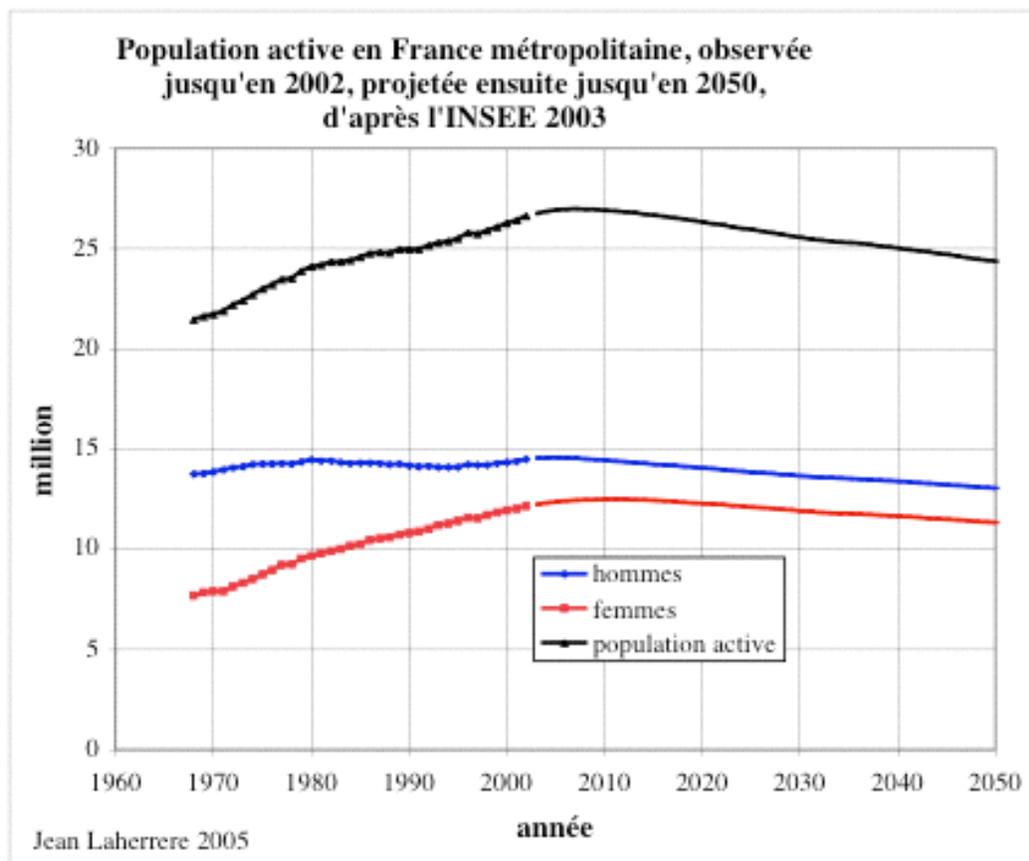
Personne en 2000 n'a prédit les 50 \$/b atteints en octobre 2004 et les 70 \$/b atteint en août 2005. USDOE et AIE en 2004 prédisent 25 \$/b pour 2030! Bauquis (2004) souhaite un nouveau choc pétrolier avec 100 \$/b en 2020 pour permettre aux renouvelables et aux économies d'énergie de résoudre le déficit en énergie qui arrivera en 2050. Le grand changement est que l'OPEP dominée par l'Arabie Saoudite, qui avait stabilisé les prix après le contre-choc de 1985 avec son mécanisme autour de 25 \$/b, vient de s'apercevoir qu'un prix de 50\$/b ne fait pas baisser la demande, contrairement à ce qu'elle craignait, et 50 \$/b est la nouvelle cible. Mais l'AIE (WEO 2005) prévoit en 2030 un prix de 39 \$2004/b (67 \$/b courant). Matt Simmons a parié 5000 \$ avec un journaliste du NYT que le prix serait de 200 \$/b en 2010! Mais Lee Raymond patron d'Exxon-Mobil prévoit un prix probable de 35 \$/b en 2015 (WSJ 9 Nov. 2005)

Prévisions DGEMP pour la France et le monde

La DGEMP (Direction Générale de l'Énergie et des Matières Premières) a publié en 2005 deux scénarios dans son étude pour une perspective énergétique concernant la France 01-02-2005 (Enerdata & LEPII pour Observatoire de l'énergie DGEMP).

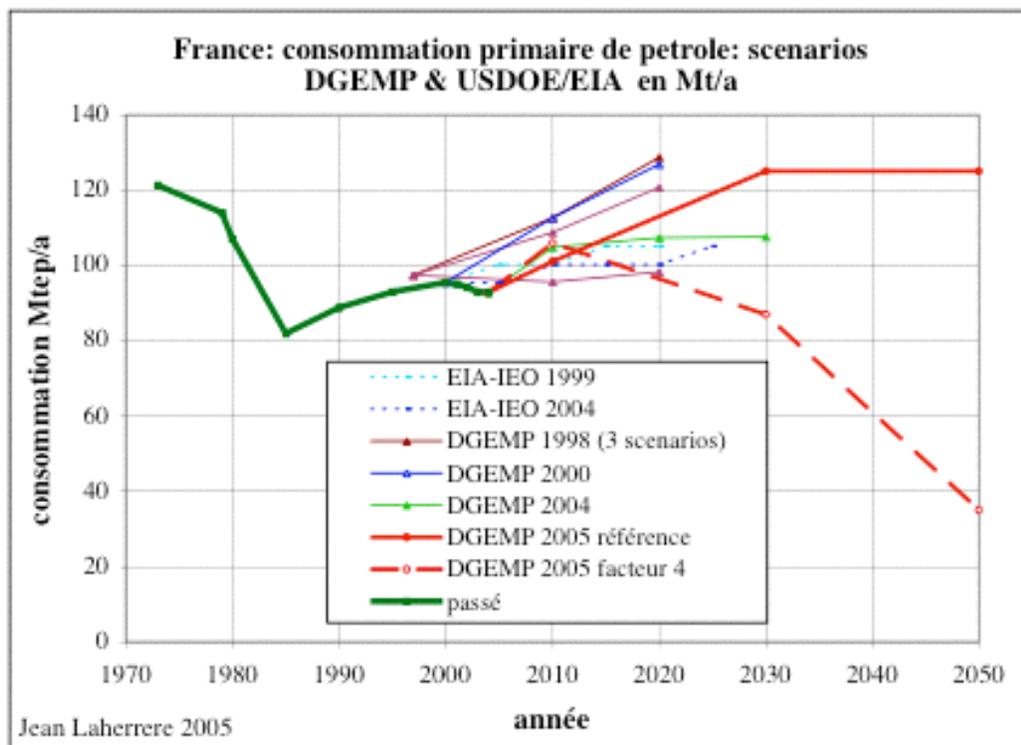
Le scénario dit de *référence* a des hypothèses très optimistes: prix de 30 \$/b de 2005 à 2030, réserves basées sur l'étude USGS, sur une croissance de 2,5%/a de 2002 à 2030, un pic de population française en 2040 mais dès 2020 pour la population active (alors que la dernière prévision de l'INSEE donne un pic de la population active pour 2006!)

Figure 2-20: population active en France d'après INSEE 2003



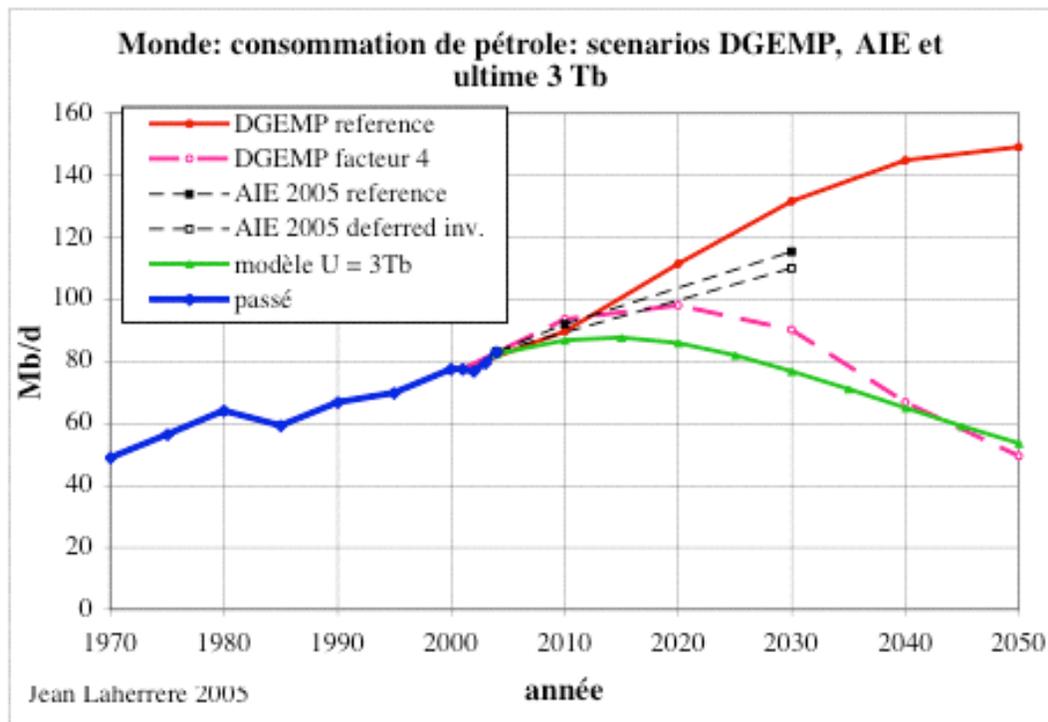
Le 2^e scénario appelé *facteur 4* a pour but de diviser les émissions de GES par 4. Les scénarios DGEMP de 1998 à 2005 pour la consommation de pétrole sont comparés dans ce graphique à celles de l'USDOE/EIA 1999 et 2004. Le scénario DGEMP 2005 référence est au-dessus des autres, comme les hypothèses le laissent supposer.

Figure 2-21: Consommation primaire de pétrole en France avec scénarios DGEMP & USDOE



La prévision DGEMP 2005 pour le pétrole mondial est bien supérieure à toutes les autres pour le scénario *référence* et le scénario *facteur 4* ressemble à ma prévision pour 2050, mais semble trop optimiste pour 2010 à 95 Mb/d (90 Mb/d au mieux pour moi). Ce scénario *facteur 4* considéré comme difficile à réaliser par les consommateurs et utopique sera en fait imposé par la Nature qui ne pourra pas fournir plus que ce qu'elle a !

Figure 2-22: Consommation mondiale de pétrole d'après DGEMP, AIE, et prévisions de réserves ultimes de 3 Tb



Le rôle des personnes dans la publication des prévisions

Le message d'un organisme dépend beaucoup de la personne qui le délivre. Les prévisions de l'AIE ont changé d'une façon évidente pour les 6 dernières années avec le directeur en charge de l'analyse long terme.

Figure 2-23: Prévision AIE 1998 par JM Bourdairé. Il y a problème, car la demande future devrait être alimentée par une offre en provenance de pétrole non-conventionnel non spécifié puisque l'offre de pétrole conventionnel va plafonner.

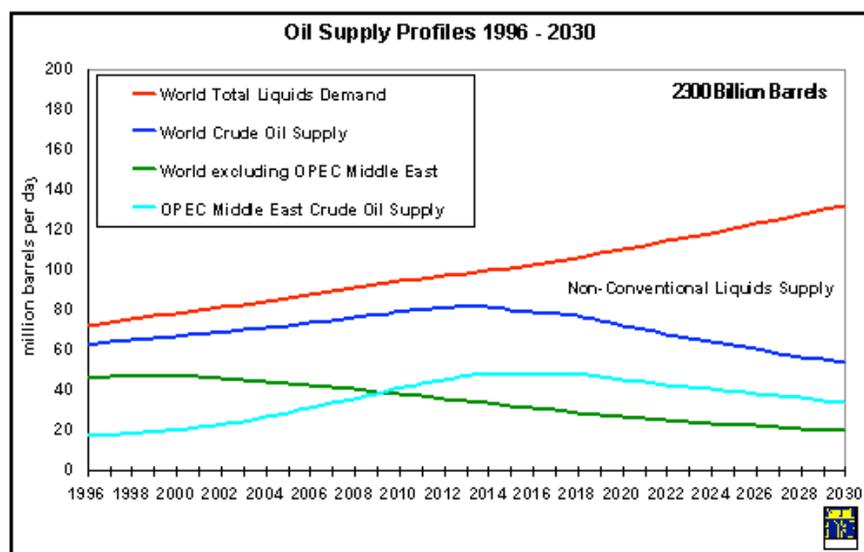


Figure 2-24: Prévision AIE 2002 par O. Appert: il n'y a plus de problème, ni pic ni beaucoup de non-conventionnel

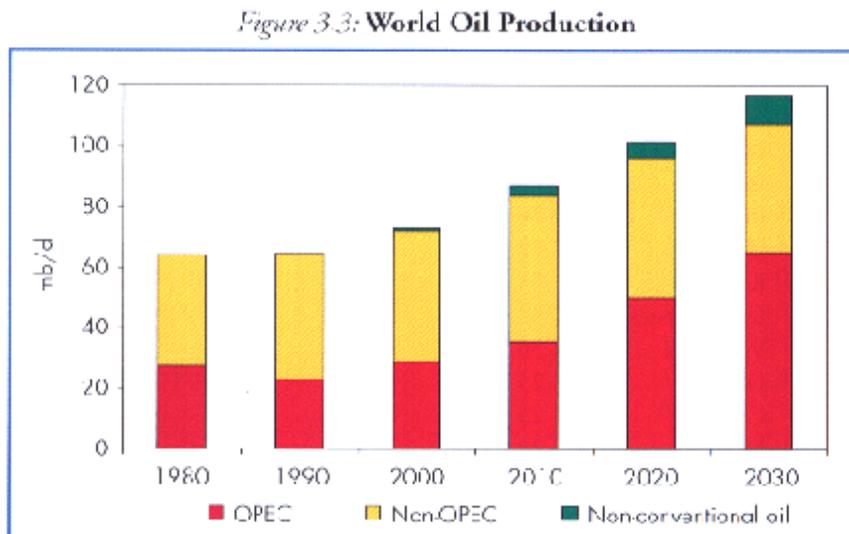
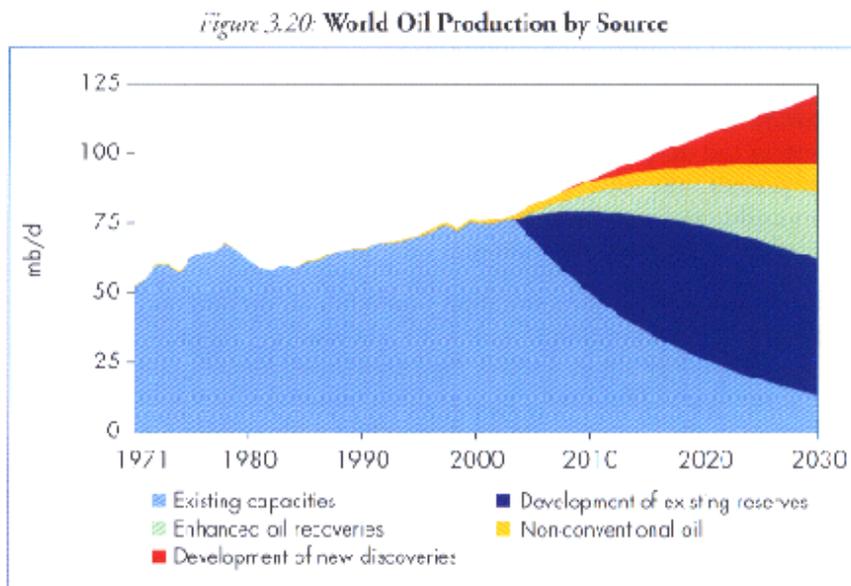


Figure 2-25: Prévision AIE 2004 par F. Birol: il peut y avoir problème car on a besoin de nouvelles découvertes, de davantage de récupération (EOR ou « enhanced oil recovery »), mais le non-conventionnel est toujours peu important



Il y eut le même changement dans les prévisions de l'USGS quand T.Ahlbrandt remplaça C. Masters. Ce dernier avait des réserves dites "inferred" (déduction des géologues) mais pas de croissance des réserves. Par contre, Ahlbrandt applique la croissance des réserves prouvées des EU (pour l'essentiel liée à la révision des chiffres trop conservateurs initiaux) aux réserves prouvées plus probables du reste du monde. Il faut comparer des choses comparables! De plus c'est bien

évidemment une absurdité car la prise en compte des réserves probables dès le départ laisse peu de place à des croissances futures.

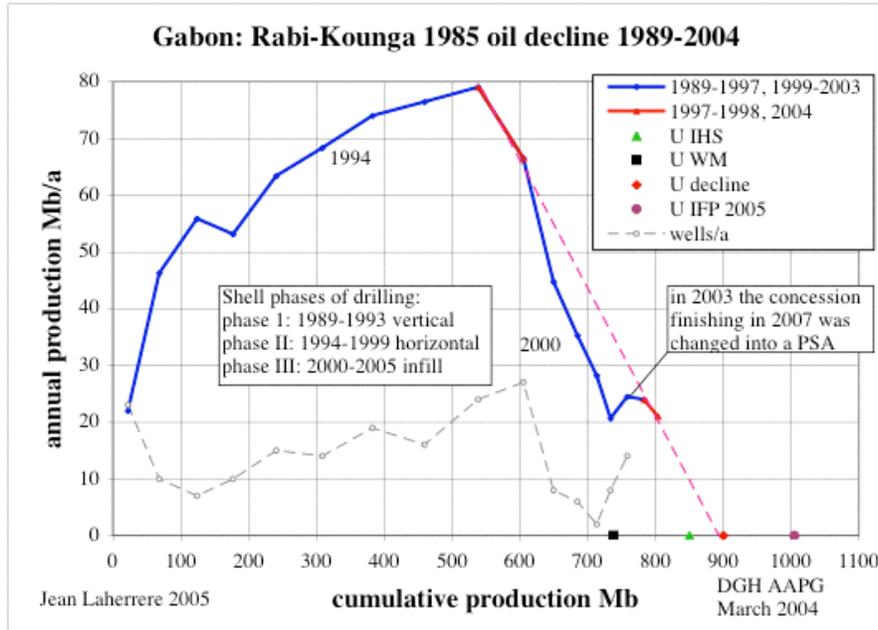
Les motivations financières

Ayant commencé ma carrière pétrolière, il y a 50 ans, j'ai pu constater de grands changements dans les techniques et dans les comportements. La corrélation entre le pic des découvertes (valeurs espérées) et celui de la production est de 35 ans aux Etats-Unis (1935 versus 1970), et de 40 ans environ pour le monde (1965 versus 2010 peut-être). Des décennies s'écoulent entre les premières campagnes d'exploration et la première production d'un bassin. En outre l'industrie pétrolière de l'époque était globalement sur capacitaire avec des tendances malthusiennes oligopolistiques consistant à produire à limiter les taux de production au niveau de la demande réelle, seul moyen d'éviter un effondrement des prix.

Une des conséquences était que l'industrie pétrolière d'il y a 50 ans raisonnait en long terme et cherchait davantage à produire un champ de façon à en extraire le maximum de pétrole en contrôlant une montée douce et lente du plan d'eau, qu'à produire très rapidement. Les choses ont changé avec la disparition des sur capacités de production, la fin de l'oligopole des « Sept Sœurs », et l'augmentation de la pression financière des actionnaires, en particulier les fonds de pension qui réclament des rentabilités élevées (> 15%/a). Avec de tel taux, le baril produit dans 10 ans a peu de valeur, même dans l'hypothèse d'augmentation de son prix.

D'où la tyrannie du court terme et la nouvelle « bonne » pratique consistant à « produire » le profit maximum actualisé, éventuellement au détriment de la récupération théorique maximum. Ceci n'est pas nécessairement négatif, mais peut le devenir. Ainsi, une technologie comme le forage horizontal permet de produire beaucoup plus aujourd'hui avec un déclin beaucoup plus rapide en fin de déplétion. La récupération finale peut être affectée, parfois moindre, parfois meilleure grâce à la possibilité de produire des poches autrefois non économiques. Il semble que ce qui s'est passé avec Shell sur le champ de Yibal en Oman et de Rabi-Kounga au Gabon sont des exemples défavorables car l'extrapolation du rapide déclin produit par les puits horizontaux semble conduire à des valeurs inférieures aux estimations annoncées (notamment par l'IFP Mai 2005) malgré une campagne de forages additionnels (« infill drilling »). Il faut comparer le déclin accéléré de Rabi avec celui de Forties (figure 5)

Figure 2-26: déclin de la production de Rabi-Kounga (Gabon) 1989-2004



-2-7-Alternative ou substitut

On lit souvent de la part des économistes que l'âge de pierre ne s'est pas terminé par manque de silex, et qu'il en sera de même de l'âge du pétrole. La pierre taillée a été remplacée par le bronze et le fer.

Le problème du pétrole est qu'il n'y a pas d'alternative qui puisse le remplacer en quantité suffisante dans le court et moyen terme.

Tous les médias sont remplis des merveilles que va nous apporter l'hydrogène, abondant sur terre et qui brûle sans polluer en ne donnant que de l'eau.

Publicité dans la Recherche Octobre 2002: livre de Rifkin

"L'Economie Hydrogène" accompagné de:

"L'hydrogène c'est possible! Une ressource énergétique révolutionnaire"

Ce livre explique bien le problème des ressources fossiles (je fais partie des géologues mentionnés). Mais la partie sur l'hydrogène est très spéculative et discutable. L'hydrogène n'est pas une ressource d'énergie, mais un vecteur comme l'électricité

L'hydrogène n'est pas révolutionnaire, la première voiture à moteur à explosion était à l'hydrogène par Isaac de Rivaz en 1805. En 1957 un B-57 a volé avec un moteur à hydrogène liquide et en 1988 le Tupolev 155. Les US en 1996 ont produit 3 Tpc/a d'hydrogène dont 1,2 pour ammoniac (engrais), 1,1 pour les raffineries et 0,3 pour le méthanol. La production de méthane sec était de 19 Tpc/a, seulement 6 fois plus.

Les nouveautés que l'on nous promet demain sont plus que centenaires.

Le véhicule qui a pour la première fois dépassé les 100 km/h était une voiture électrique française en 1899. La pile à combustible date de 1839.

Usine Nouvelle 3/9 Octobre 2002 n°2841 p10

"Les prix des hydrocarbures sont en forte hausse. Les énergies renouvelables peuvent-elles prendre le relais du pétrole?"

Oui JEREMY RIFKIN président de la Foundation on Economic Trends (Washington), vient de publier "L'Economie hydrogène" (La Découverte). "L'hydronet est pour demain".

"Installées dans les usines, les bureaux, les habitations, les automobiles, les piles à combustible deviendront des microcentrales contrôlées par leurs utilisateurs, à la fois producteurs et consommateurs. Ce mode de production répartie, associé aux dernières technologies informatiques reliant les microcentrales entre cités, va donner naissance à l'"hydronet" . Ce sera la première solution énergétique vraiment démocratique de l'histoire humaine."

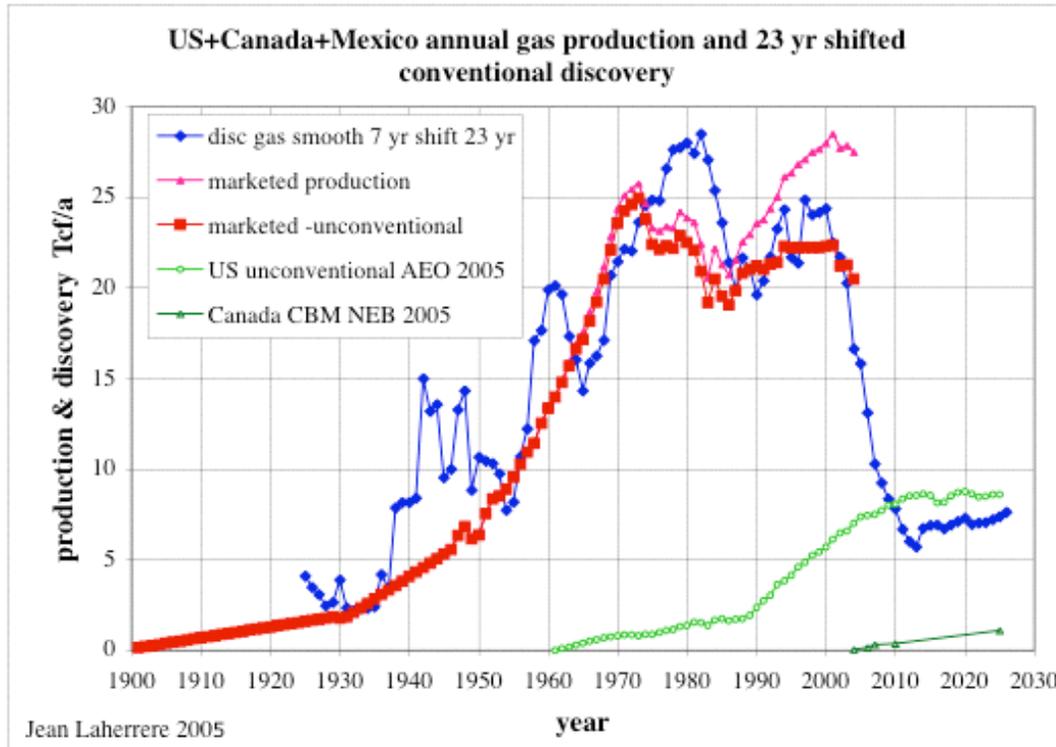
NON PIERRE-RENÉ BAUQUIS, ancien directeur stratégie-planification de Total, professeur à l'École nationale supérieure du pétrole et des moteurs. *"Leur coût est dissuasif."*
"Les énergies renouvelables ne se développent que parce qu'elles sont massivement subventionnées. Par rapport à l'électricité classique, l'électricité éolienne coûte deux fois plus cher et l'électricité solaire cinq fois plus cher. . Selon certaines études, le déficit énergétique en 2050 devrait atteindre de 4 à 5 milliards de tonnes équivalent pétrole (Gtep). Aussi voit-on mal comment on pourra atteindre la fin du siècle en se passant du nucléaire. Certains experts estiment que les énergies renouvelables représenteront en 2050 les trois quarts des 4 à 5 Gtep d'énergies non fossiles, et le nucléaire un quart. Je penche pour la proportion inverse, mais ce n'est pas demain que nous aurons la solution"

-3- Gaz

Le transport du gaz coûte de 7 à 10 fois plus cher que celui du pétrole. S'il n'y a qu'un seul marché mondial du pétrole, il y a trois marchés du gaz (Amérique du Nord, Europe et Asie Pacifique). L'Amérique du Nord consomme la production locale avec très peu pour le moment de gaz liquéfié, mais avec de plus en plus de gaz non-conventionnel aux US. La comparaison entre la production de gaz conventionnel et les découvertes conventionnelles décalées de 23 ans suggère une chute spectaculaire de la production, chute juste amorcée. Mais les prévisions sur le gaz non conventionnel (US et Canada) montre un plateau dès 2010 laissant peu d'espoir au déclin global. Seul le recours au gaz liquéfié permettra de satisfaire la demande qui a diminué aussi avec le doublement des prix. Mais il faut construire des terminaux (problème NIMBY).

Marche Amérique du Nord

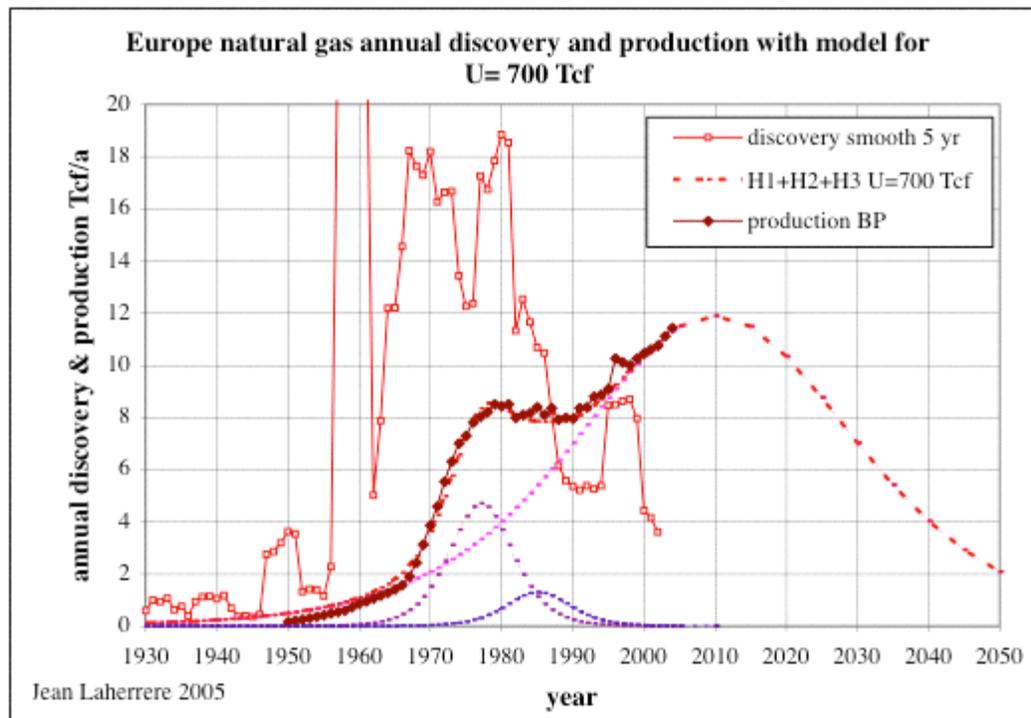
Figure 3-1: US+Canada+Mexique: production annuelle de gaz conventionnel comparée aux découvertes annuelles décalées de 23 ans



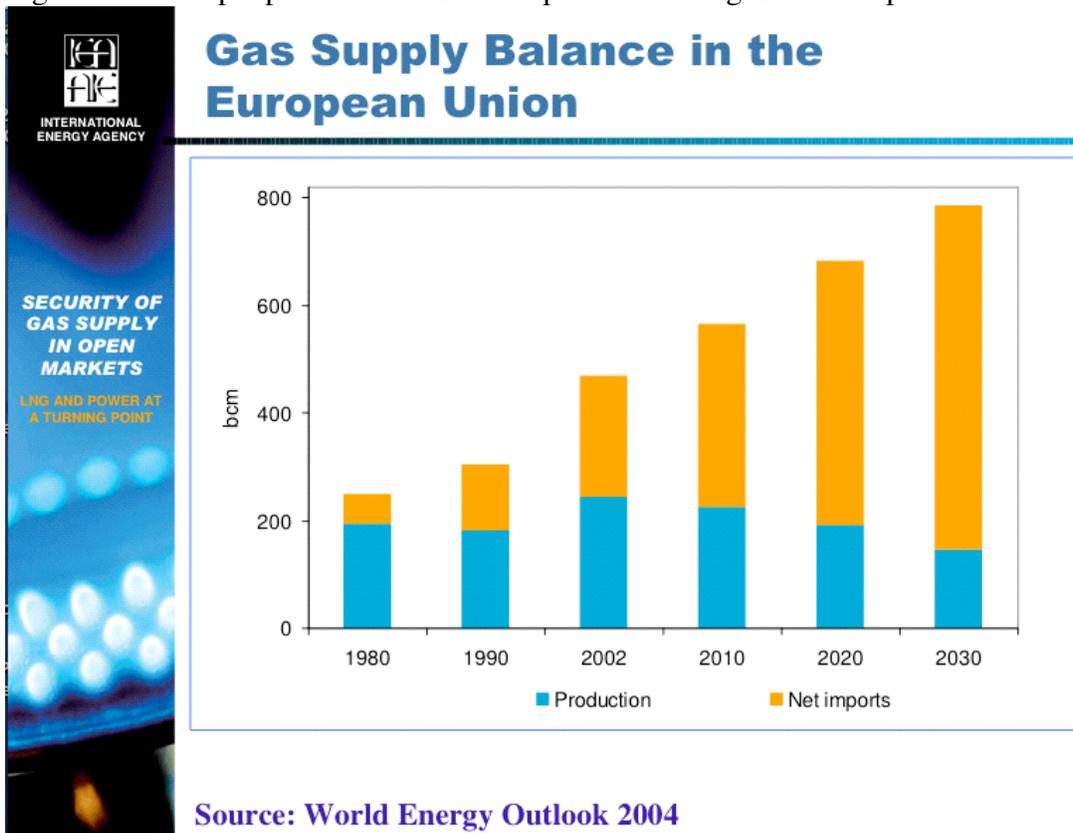
Marché gaz Europe

La courbe d'écrémage donne un ultime de 700 Tcf qui suggère que l'Europe est très proche du pic de production.

Figure 3-2: Europe: production annuelle de gaz avec modèle pour un ultime de 700 Tcf



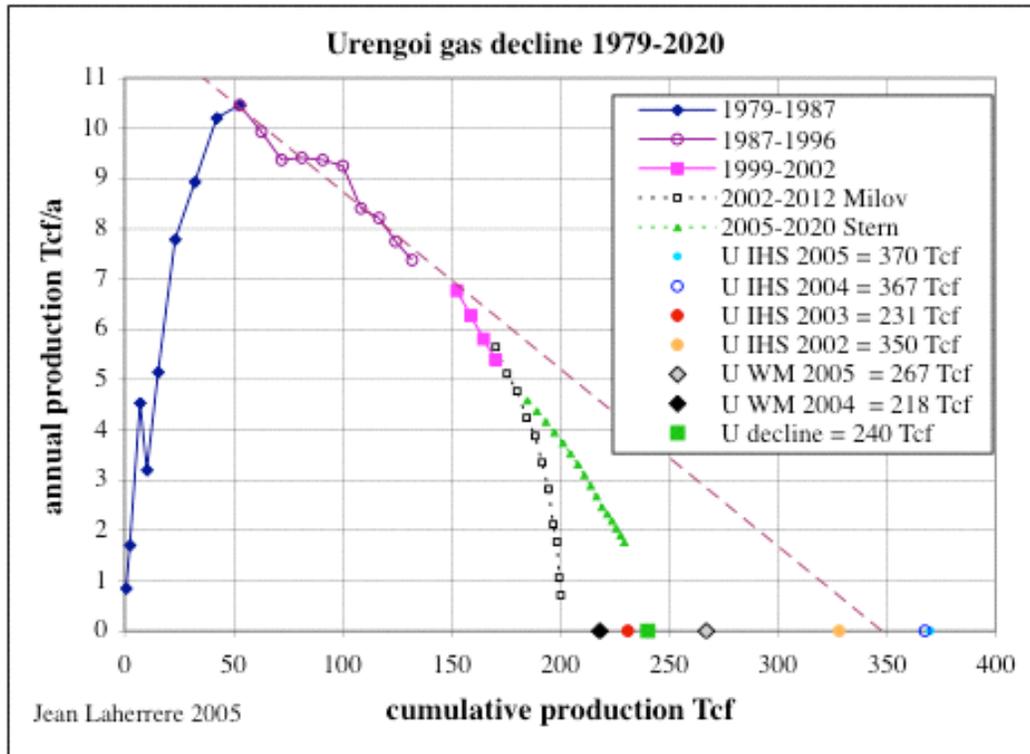
La production de gaz d'Europe déclinera dès 2010 comme le prévoit aussi l'AIE (Cornot 2004), mais d'où viendront les importations en 2030? Des gazoducs de l'ex-URSS et du gaz liquéfié?
 Figure 3-3: Europe: prévisions AIE sur la production de gaz et les importations



L'Europe compte trop sur les réserves de gaz russe. Khalimov (vice ministre du pétrole) a présenté la classification Russe en 1979, mais en 1993 il l'a qualifié de *grossièrement exagérée*; car les réserves sont calculées avec le rendement théorique maximum, elles représentent donc les réserves 3P (prouvé+probable+possible) et il faut les corriger de 30% pour obtenir les valeurs espérées (2P). Cedigaz (Chabrelié 2005) a déclaré que les réserves Gazprom déclarées à 28 T.m³ ont été certifiées à seulement 18 T.m³ par De Golyer.

Le plus grand champ russe Urengoi (considéré il y a peu et encore par certains comme le plus grand champ de gaz du monde, bien que North Dome (Qatar et Iran) soit bien 5 fois plus grand!) a des réserves fournies par IHS qui sont très erratiques allant de 350 à 230 puis 370 Tcf, alors que la courbe de déclin avec les prévisions (Milov et Stern) suggère une valeur de 240 Tcf.

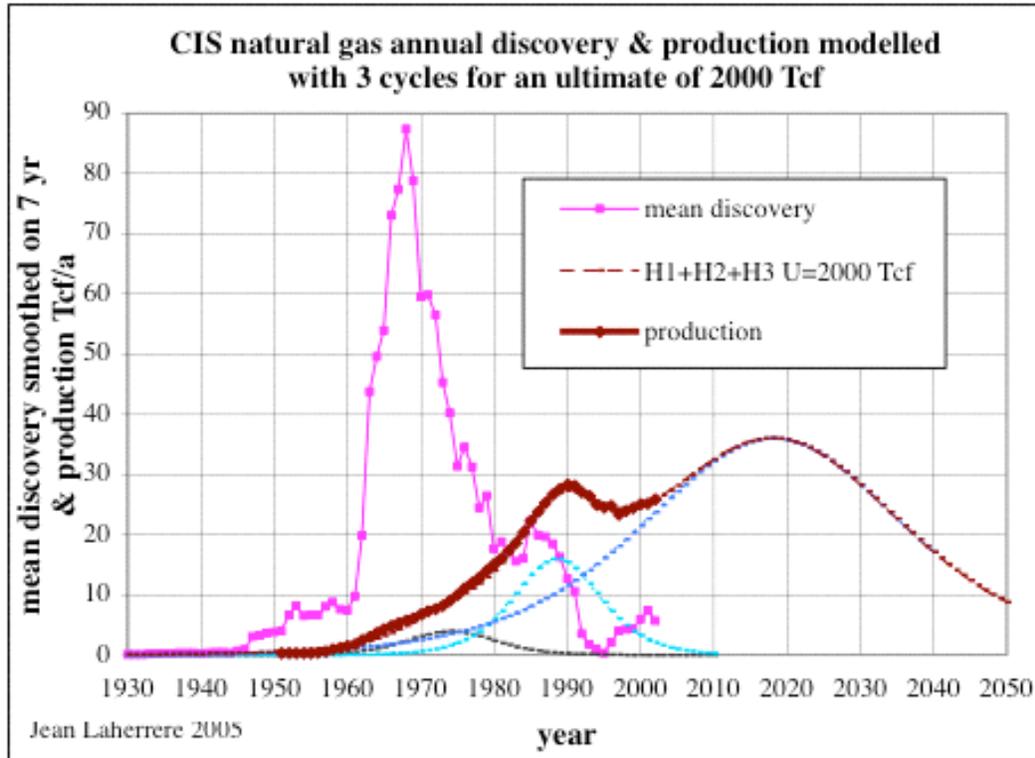
Figure 3-4: Déclin du champ de gaz d'Urengoi Russie



Les trois grands champs des gaz qui fournissaient la majorité de la production russe sont en déclin et les réserves de Yamal sont encore non développées car incertaines et chères comme Shtokman à 300 m d'eau et à 600 km des côtes dans l'Arctique

La courbe d'écrémage pour l'ex-URSS après une correction à des valeurs 2P suggère un ultime de 2000 Tcf et un pic vers 2015-2020 à 37 Tcf/a. L'Europe aura besoin d'importer 500 G.m³ pour 2020, contre 200 Tcf pour 2002, soit une augmentation de 300 G.m³ ou 10 Tcf/a; ce qui représente tout juste l'augmentation de production de l'ex-URSS qui compte augmenter sa production domestique et exporter vers l'Asie. Ce sera donc difficile en 2020 et impossible après.

Figure 3-5: ex-URSS: production annuelle de gaz avec modèle pour un ultime de 2000 Tcf



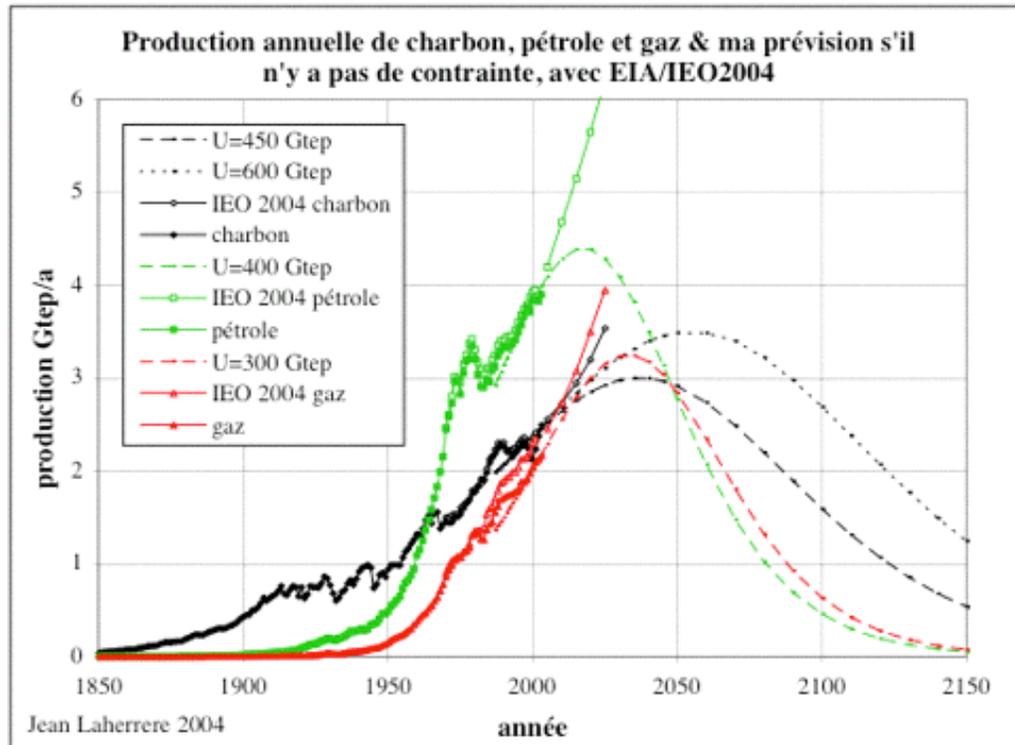
Il existe des quantités de gaz importantes gelées (stranded) car trop loin des marchés, qui demandent des investissements considérables pour être produites et transportées. Et l'on peut s'attendre sous peu (sauf crise économique) à une pénurie de gaz en Amérique du Nord et ensuite en Europe avec une compétition pour disposer des méthaniers (nombre actuel environ 150). Mais s'il y a crise comme tout le monde se précipite pour construire des usines de congélation, des terminaux et des méthaniers, on peut avoir aussi surplus!

-4-Combustibles fossiles et Energie primaire

-4-1-Combustibles fossiles

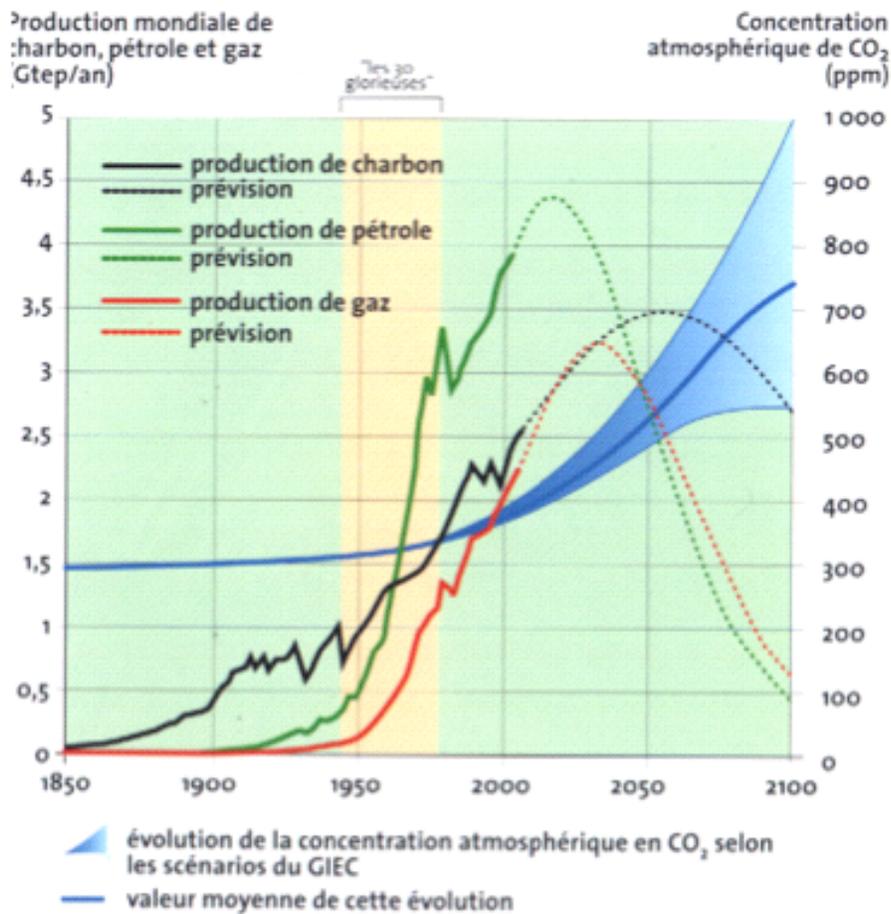
A partir des estimations de réserves ultimes: 400 Gt pour le pétrole, 300 Gtep pour le gaz et 450 à 600 Gtep pour le charbon, on peut tracer les courbes théoriques (sans contrainte de la demande) des productions futures espérées.

Figure 4-1: prévisions mondiales pétrole (U=400 Gt) et gaz (U=300 Gtep) et charbon (U= 450 et 600 Gtep) sans contrainte de la demande



Mes prévisions des pics: pétrole 2015, gaz 2030, charbon 2050, sont confirmées par un graphique de J.Varet dans un document IFP-BRGM-ADEME 2005 «La capture et le stockage géologique du CO2»

Figure 4-2: Production mondiale annuelle de charbon, pétrole et gaz 1850-2100, document IFP-BRGM-ADEME montrant la courbe du CO2 d'après les scénarios du GIEC (sur des bases énergétiques très différentes et irréalistes: voir figure 39)



-4-2-Energie primaire

Pour comparer les énergies et les ramener à une unité unique, il faut faire certaines hypothèses d'équivalences, hypothèses qui sont largement ignorées dans la plupart des discussions.

Unités et équivalences

Depuis 1993 les agences fédérales américaines sont obligées d'utiliser le SI = Système International d'unités, qui est la loi en Europe (sous peine d'amende!).

Le baril de pétrole n'est pas une unité légale aux US, mais c'est le gallon (3,5 l), les agences fédérales sont obligées d'écrire après barrel (42 US gallons). Le sigle bbl est souvent utilisé par ceux qui ignorent ce que cela veut dire: blue barrel, pourquoi bleu?

L'industrie pétrolière américaine s'accroche à des symboles périmés comme le M pour millier alors que l'Américain de la rue parle de megabyte (MB) pour son ordinateur et de bug de l'an Y2K.

La perte de la sonde américaine sur Mars à l'automne 99 est due à ce que la Nasa a envoyé des instructions en unité métrique alors que Lockheed l'avait construite en unité anglo-saxonne.

L'industrie pétrolière anglaise viole la loi en utilisant mn pour million.

Tous ceux (99% des papiers, en particulier français) qui pensent bien faire en utilisant Gm³ pour milliard de mètres cubes, oublient ce qu'ils ont appris en sixième et que cela représente un gigamètre au cube (environ un million de fois le volume de la terre) alors que le milliard de mètres cubes est un kilomètre cube, on peut à la rigueur écrire G.m³, sinon km² représente un millier de mètres carrés soit 0,1 hectare.

L'énergie (et le travail ainsi que la chaleur) est mesurée en joule (J). Mais la chaleur peut être un objectif ou une nuisance. La puissance d'une énergie est mesurée en watt (W) qui correspond à un joule par seconde. Une facture en kWh est une complication (qui plait à EDF et GDF) car c'est une quantité de travail et elle devrait être en joules puisque 1 kWh = 3,6 MJ (megajoule). En Belgique, la note d'électricité et de gaz est en gigajoules (GJ). En Australie et au Canada, tout est exprimé en petajoules.

Le problème est que travail et chaleur sont maintenant mesurés avec la même unité (autrefois il y avait la calorie), alors que la **chaleur peut être un objectif ou une nuisance**.

Il y a souvent confusion dans l'énergie d'un système entre l'énergie à l'entrée et l'énergie à la sortie.

La définition légale en France de la tonne équivalent pétrole est 1 tep = 42 GJ.

Un MWh, égal à 3,6 GJ, représente donc à la sortie à $3,6/42 = 0,086$ tep, mais pour produire ce MWh, si la centrale a un rendement de 33%, il faut donc à l'entrée 3 fois plus de pétrole pour le produire, soit 0,26 tep.

Les équivalences entre énergies varient suivant les organismes et pays.

En 2001 le ministère de l'industrie (DGEMP) a changé ses conventions avec pour but de s'aligner sur ce que font les autres organismes en prenant un rendement de 33% pour le nucléaire (Total prend 40% et le Conseil Mondial de l'Energie 38,6 %), 10 % pour la géothermie et 100 % pour le classique et renouvelables. Ce sont des conventions discutables!

Le bilan révisé en pourcentage est donc ainsi profondément modifié:

Consommation d'énergie primaire en 2001 en %

	Nouvelle méthode	Ancienne méthode
Charbon	4,4	4,6
Pétrole	35,9	38,5
Gaz	13,8	14,5
Nucléaire	38,8	30,8
Hydraulique, éolien, photovoltaïque	2,5	6,9
Autres énergies renouvelables	4,5	4,7

Consommation d'énergie finale en 2001 en %

	Nouvelle méthode	Ancienne méthode
Charbon	3,9	2,9
Pétrole	51,3	39,8
Gaz	19,0	14,4
Electricité	19,6	38,3
Energies renouvelables thermiques	6,1	4,6

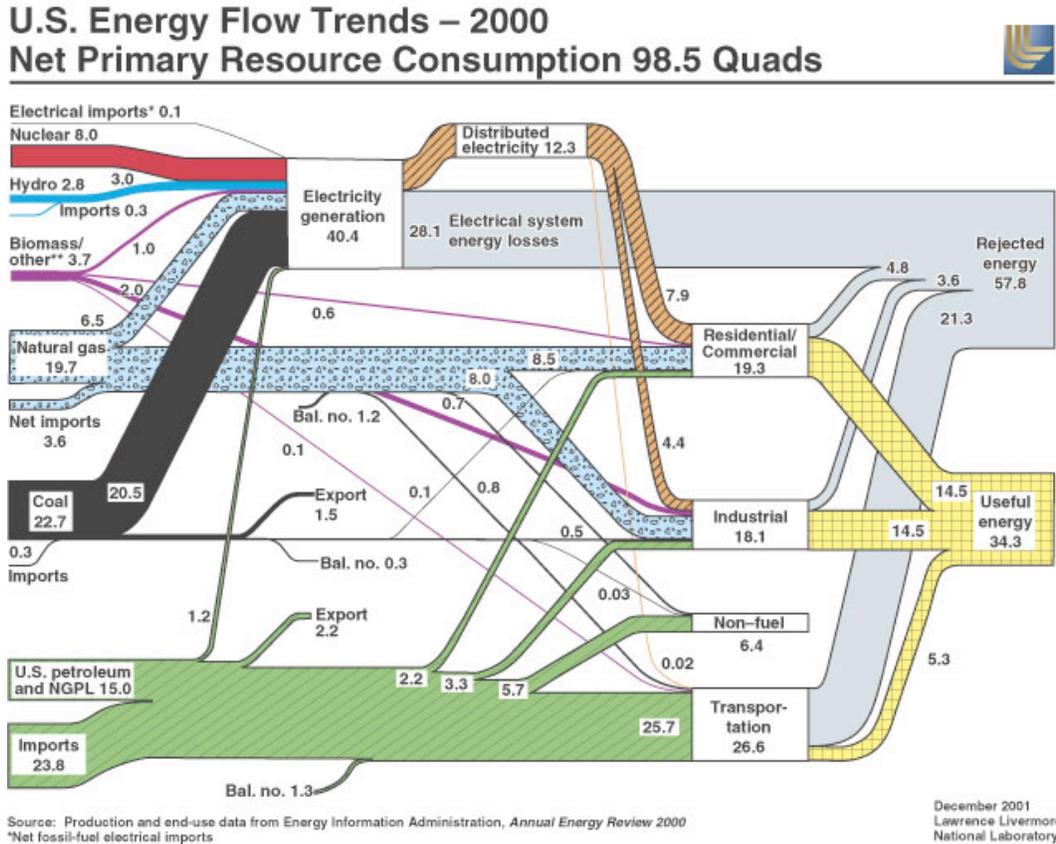
La presse a parlé de manipulations, mais en fait les journalistes n'ont rien compris à la complexité du problème.

Les énergies éoliennes sont surtout données en puissance théorique installée (comme si le vent soufflait constamment) et non en puissance réelle produite, il faut les corriger d'un facteur de l'ordre de 5 à 20.

Le bilan énergétique mondial comporte, suivant les auteurs, les énergies non commerciales ou non. Mais si l'énergie utilisée pour le tracteur qui laboure est comptée, l'énergie pour nourrir le bœuf ou le cheval qui laboure n'est pas comptée. De même l'énergie utilisée pour la voiture qui nous transporte est comptée, mais pas l'énergie qui nous nourrit quand nous marchons ou allons en bicyclette.

L'énergie de l'alimentation des hommes et des animaux de trait représente plus de 10% du total énergétique, mais elle n'est pas comptée dans les bilans officiels qui comprennent pourtant la biomasse non-commerciale consommée pour chauffer (mais pas se nourrir).

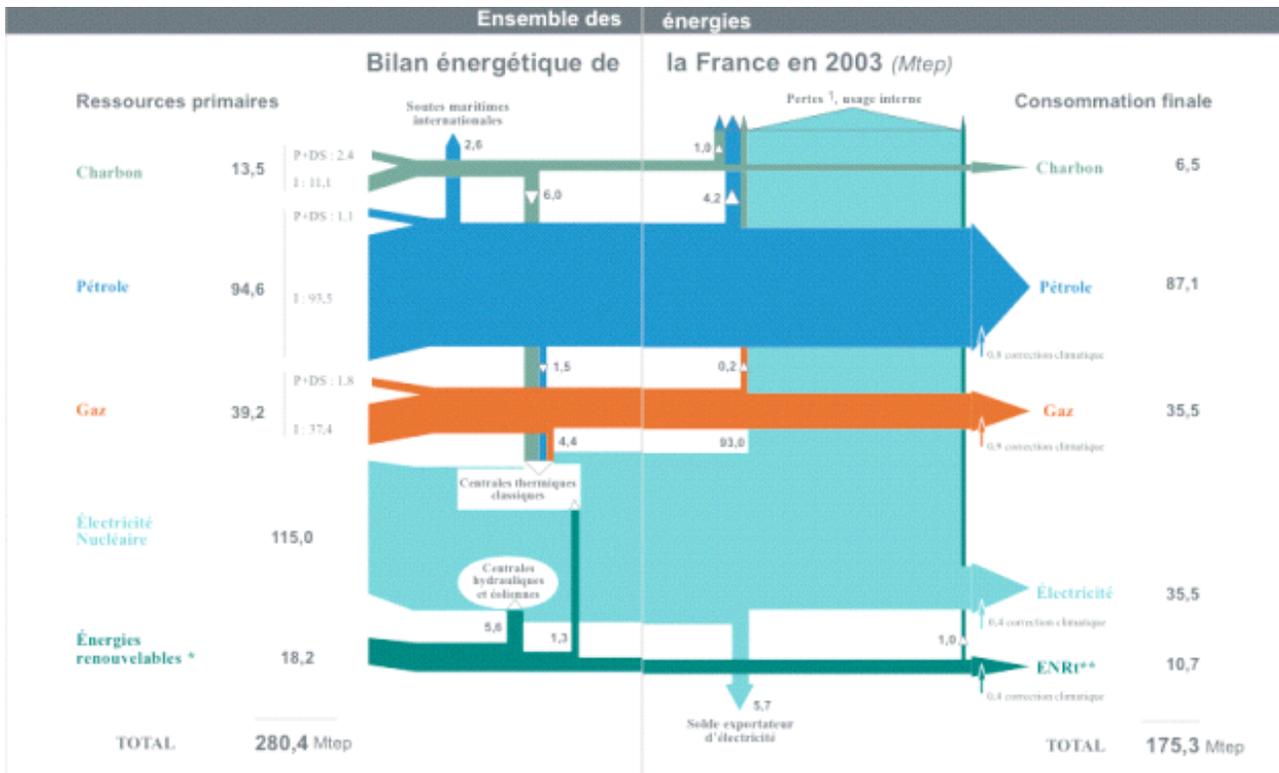
Le graphique du flux de l'énergie aux EU montre la complexité de la consommation et la perte à la sortie: 62 % en moyenne, mais 80 % pour le transport et 70% pour la génération d'électricité
 Figure 4-3: Flux de l'énergie primaire aux US 2000



L'énergie utile est de 34,3 quads

Pour la France

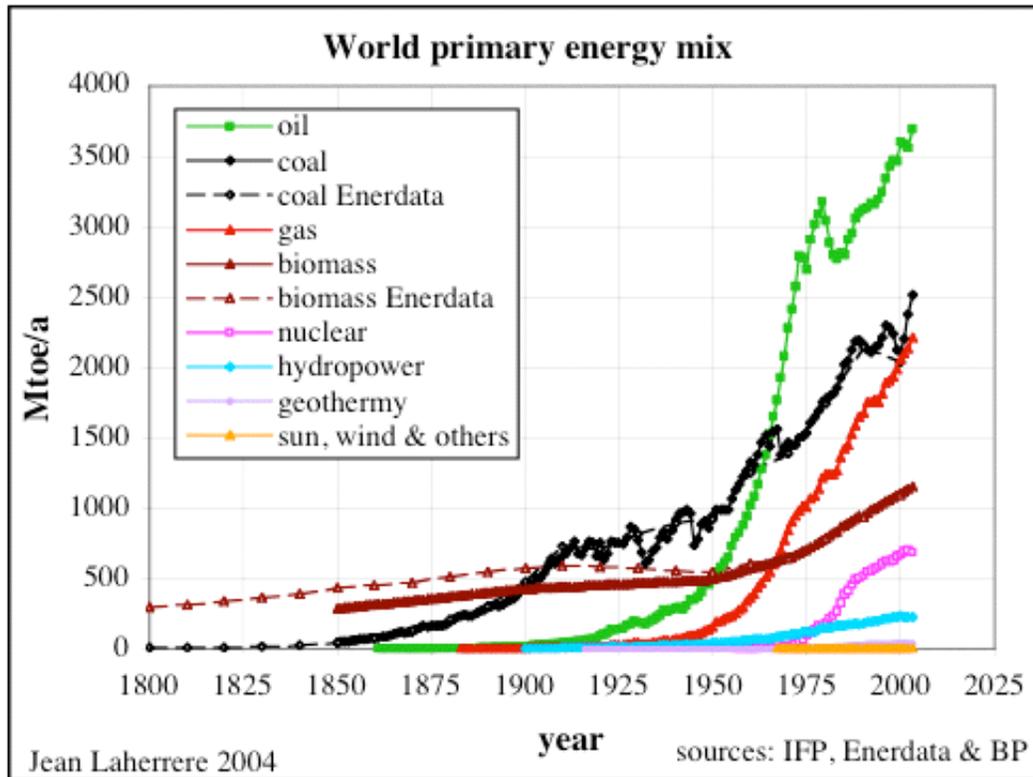
Figure 4-4: flux énergétique en France en 2003 de 280 Mtep à 175 Mtep



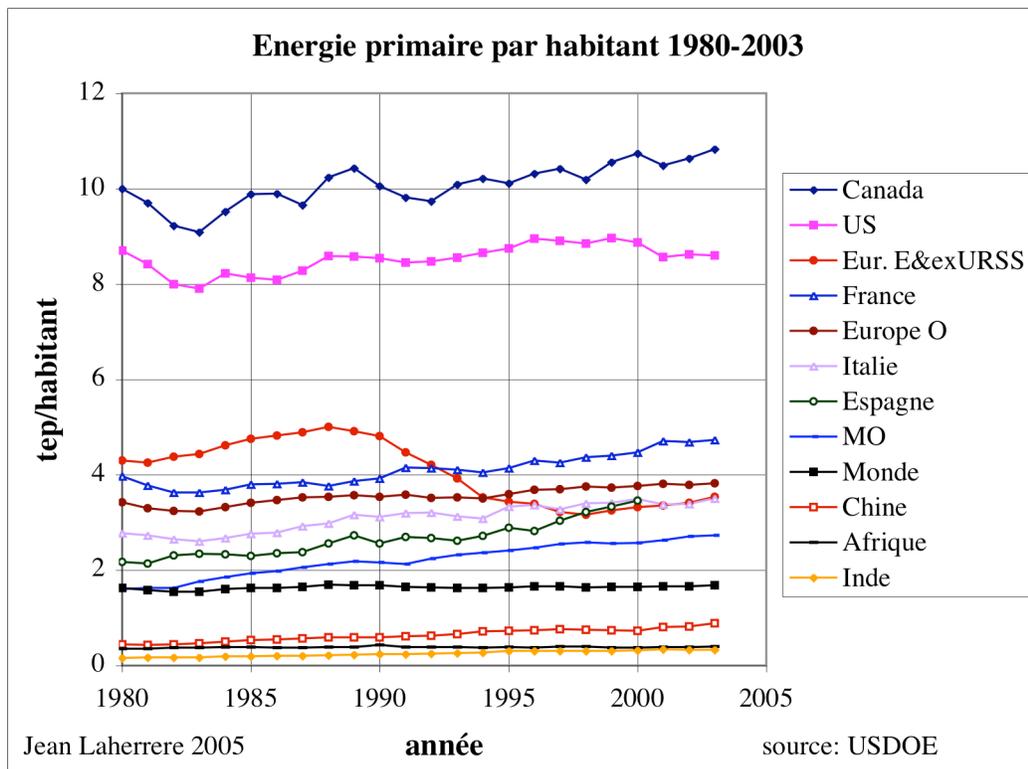
il est écrit: Pertes 1: “l’importance des pertes dans le domaine de l’énergie tient largement au mode de calcul adopté depuis 2002 par l’Observatoire de l’Energie: l’électricité d’origine nucléaire est comptabilisée, au niveau de la production, en termes de chaleur, dont les deux tiers sont perdus lors de la conversion en énergie électrique”

Il est difficile d’obtenir les données historiques de l’énergie primaire remontant a plus d’un siècle. De plus seules les énergies commerciales sont rapportées alors que durant des siècles les civilisations se sont construites avec pour énergie : les muscles des hommes et des animaux, le bois ou les bouses de vaches, les moulins à vent et a eau, données difficiles à chiffrer et qui ne sont pas comptabilisées!.

Figure 4-5: **Energie primaire mondiale 1800-2003**



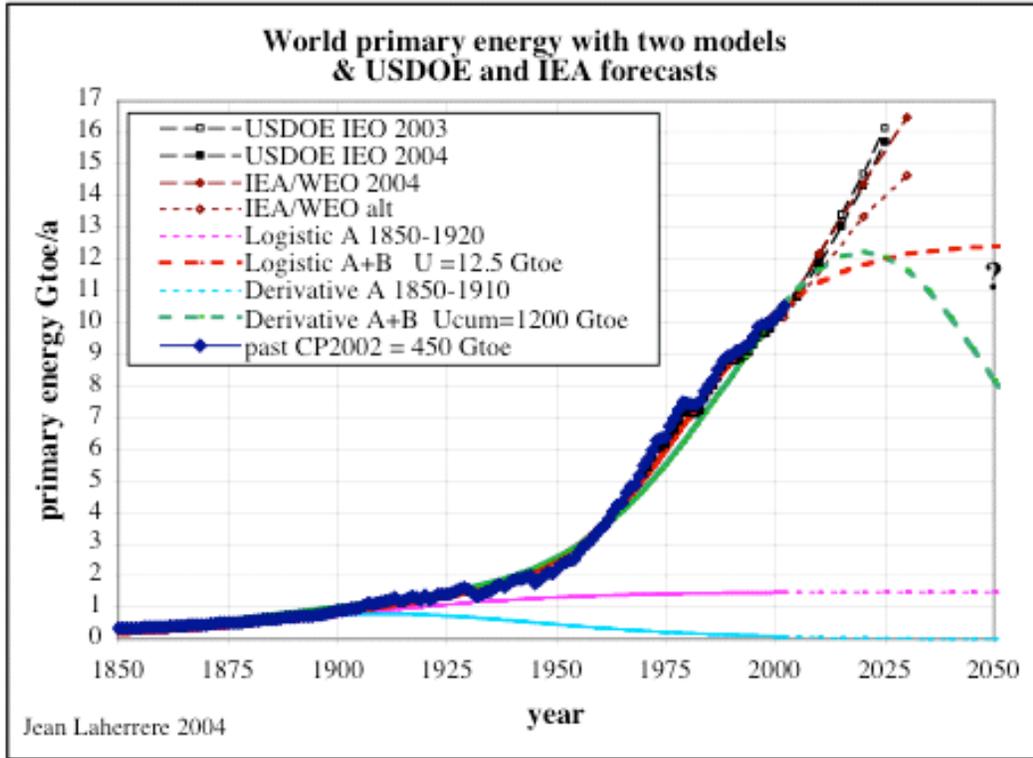
L'énergie primaire mondiale par habitant est stable depuis 1980 à 1,7 tep/hab.
 Figure 4-6: **Energie primaire par habitant et par pays 1980-2003**



Le plus énergivore est le Canadien et le moins l'Indien !

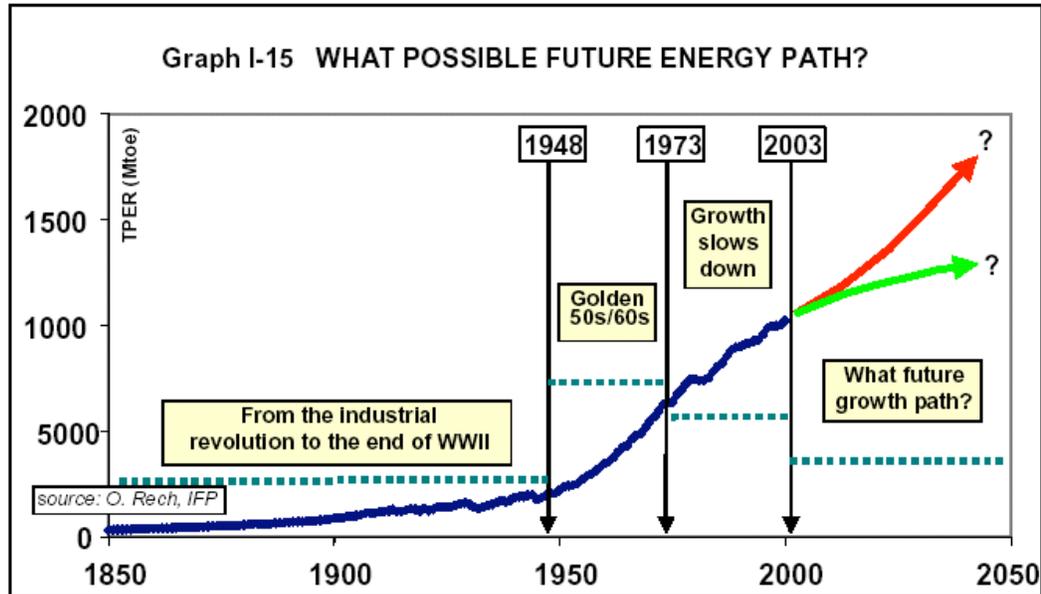
Les prévisions AIE et USDOE sont essentiellement politiques, *business as usual*, à savoir extrapolation linéaire du passé (croissance constante), alors qu'une extrapolation courbe (changement de concavité depuis le choc pétrolier) mène soit à un pic soit à une asymptote

Figure 4-7: **Energie primaire mondiale 1850-2050 avec 2 modèles et les prévisions AIE et USDOE**



Les prévisions 2003 du Conseil Mondial de l'Énergie montrent soit une croissance continue (en rouge), soit un ralentissement (en vert)

Figure 4-8: **Prévision 2003 du Conseil Mondial de l'Énergie pour l'énergie primaire 1850-2050**



Critiques en 2002 du Conseil Mondial de l'Energie (WEC) des prévisions anciennes avec des nouvelles fort différentes

"The drivers of the energy scene" Le Caire 20-26 Octobre 2002

Variable	1998 IIASA/WEC	2000 IIASA/IPCC	Extrapolation du passé
Population 2050	10,1	8,7	8 milliards
Population 2100	11,7	7,1	<6 milliards
PIB 2050/1990	3,7-5	4-9	2-3
PIB 2100/1990	10-15	11-25	3
Energie 2050/1990	1,6-2,8	2,3-4	<2
Energie 2100/1990	2,3-5	1,5-6,3	<2
CO2 2100	450-750	450-950	<550 ppm

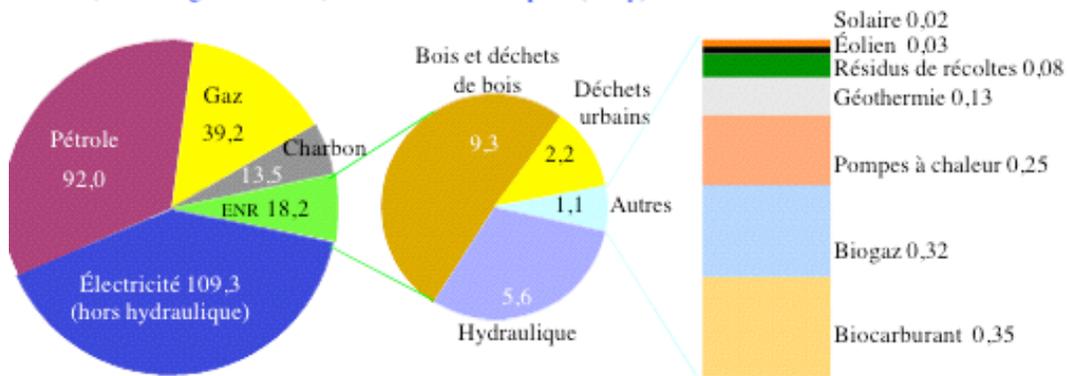
Pour le WEC, le problème de la production pétrolière n'est pas la taille du réservoir, mais la taille du robinet (qui dépend des investissements)

-Renouvelables en France

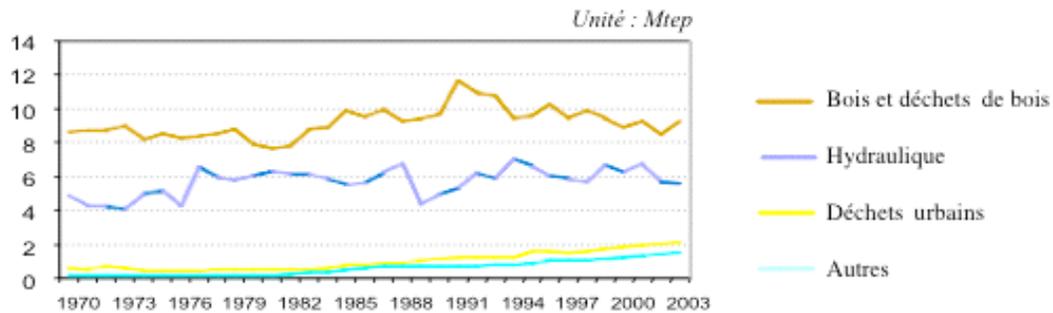
La DGEMP publie le graphique suivant des énergies primaires en 2003 où le renouvelable ne fait que 18 Mtep sur un total de 272 Mtep (chiffre différent du graphique précédent)

Figure 4-9: **Energie primaire en France avec détail du renouvelable**

- Part des énergies renouvelables (ENR) dans la consommation totale d'énergie primaire (non corrigé du climat) en 2003 en Métropole (Mtep)



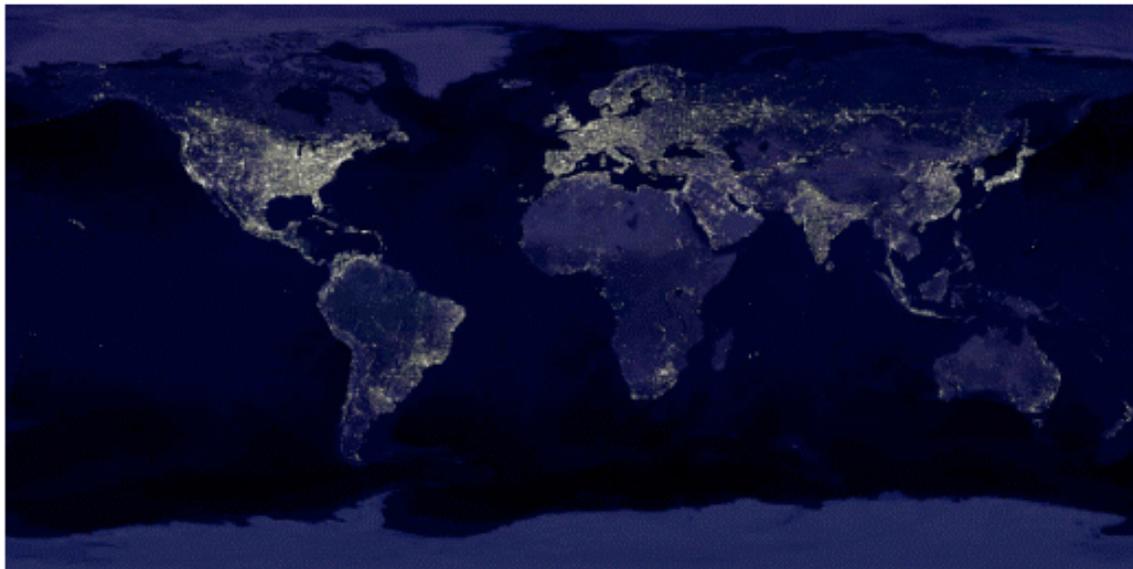
- Principales filières ENR en France (Métropole + DOM), de 1970 à 2003



Le renouvelable ne bouge guère et reste négligeable en dehors des bois, déchets et hydraulique.

-Intensité lumineuse et revenus

Il est intéressant de regarder l'intensité lumineuse la nuit sur les photos satellites du monde
Figure 4-10: vue de satellite de nuit du monde



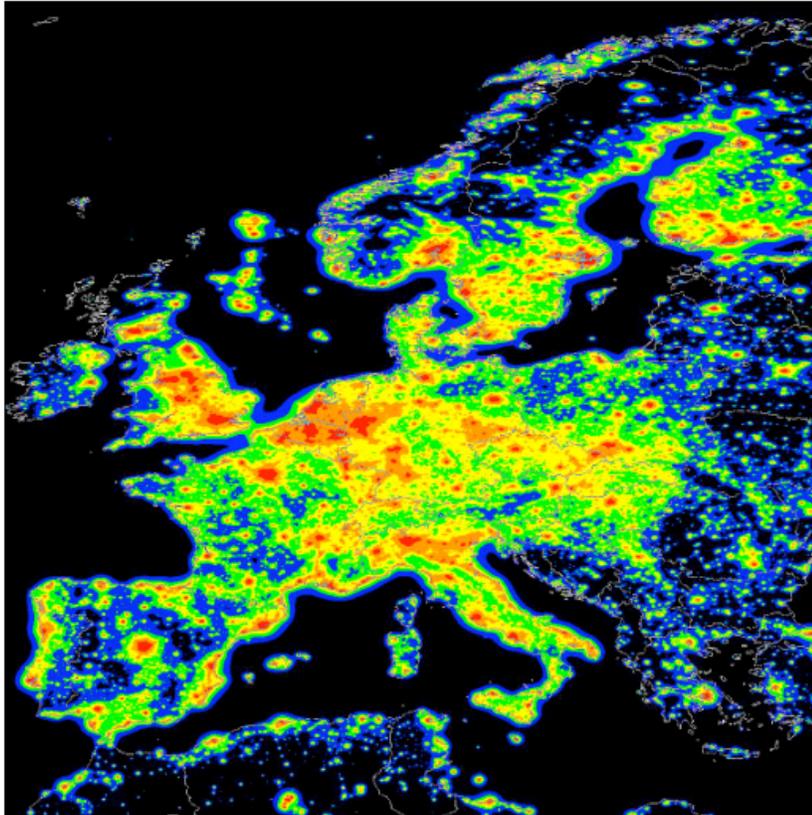
La panne autour de New York l'été 2003 se voit bien

Figure 4-11; Amérique du Nord pendant la panne du 14 août 2003



L'Europe a des pôles de lumière liés à la population, l'industrie et le tourisme. C'est un gaspillage considérable d'énergie d'éclairer le ciel plus que la terre !

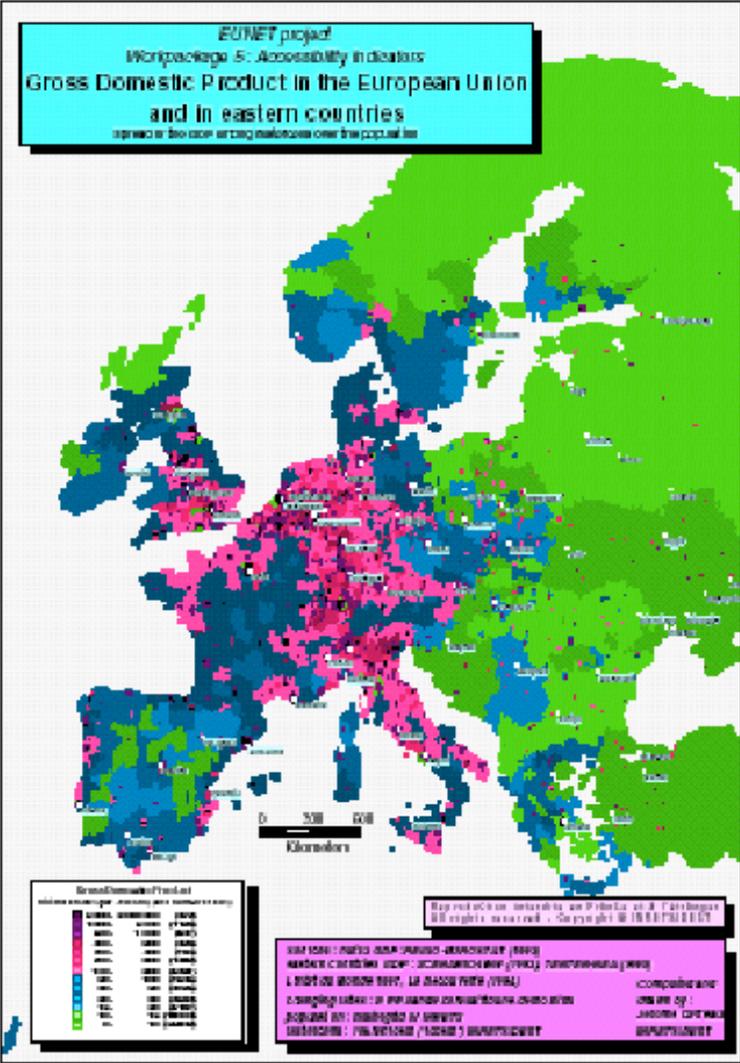
Figure 4-12: vue de l'Europe



On voit les champs de la Mer du Nord et les endroits dépeuplés en France (Bretagne) et en Espagne

Cette carte de luminosité la nuit est proche de celle du PIB par kilomètre carré en Europe d'après Jerome Carreau

Figure 4-13: Carte de l'Europe d'après le PIB/km2



<http://www.inrets.fr/ur/dest/europe/eunetpdf/gridgdp.pdf>