



Université du Québec à Chicoutimi

Rapport d'étude

Macroéconomie Février 2006

Environnement de l'organisation

Le déclin de l'économie pétrolière

Présenté à : **Thierno Diallo**
Professeur

Par:

Pascal Gagnon

Avril 2006

Ce document a été préparé dans le cadre d'un travail pour un cours de maîtrise en gestion des organisations de l'Université du Québec à Chicoutimi. Les propos, idées et théories apportés dans ce document ne proviennent pas des autorités de l'Université du Québec à Chicoutimi ni ne sont spécifiquement endossés par l'Université du Québec à Chicoutimi.

Copyright © 2006 Tout droits réservés par Pascal Gagnon

Toute reproduction pour transmission est interdite sans la permission de l'auteur.

Table des matières

TABLE DES MATIÈRES	3
TABLE DES ILLUSTRATIONS	4
INDEX DES TABLEAUX	4
INTRODUCTION	5
SECTION 1 : L'ANALYSE DE LA PRODUCTION ACTUELLE DU PÉTROLE	6
PRINCIPES GÉNÉRAUX DE PRODUCTION DU PÉTROLE	7
<i>Pic de Hubbert</i>	<i>8</i>
<i>Estimations et prévisions de la production</i>	<i>10</i>
<i>Difficultés et différences dans les estimations</i>	<i>13</i>
<i>Les types de déplétion de Chris Skrebonski</i>	<i>15</i>
LA PRODUCTION ACTUELLE DU PÉTROLE	17
<i>Le Modèle Bass Stochastique – Filtre de particule</i>	<i>20</i>
<i>Les barrières techniques, politiques et humaines</i>	<i>21</i>
<i>Conclusion</i>	<i>25</i>
SECTION 2 : LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE ET LA CROISSANCE ÉCONOMIQUE	27
LA CROISSANCE ÉCONOMIQUE SELON LA MACROÉCONOMIE NÉOCLASSIQUE	28
LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE ET LA CROISSANCE ÉCONOMIQUE	28
<i>ERFEI</i>	<i>31</i>
<i>Le bois, source primaire d'énergie exosomatique</i>	<i>31</i>
<i>La nutrition, l'essence de la croissance</i>	<i>31</i>
<i>Implications de l'énergie dans le système économique</i>	<i>33</i>
<i>La corrélation entre le pétrole et l'économie</i>	<i>38</i>
CONCLUSION	41
SECTION 3 : ANALYSE ET CRITIQUE DES ALTERNATIVES ET SOLUTIONS PROPOSÉES	42
ALTERNATIVES AU NIVEAU DE L'APPROVISIONNEMENT EN ÉNERGIE	43
<i>Énergie solaire directe</i>	<i>45</i>
<i>Énergie éolienne</i>	<i>46</i>
<i>Voiture hybride</i>	<i>47</i>
<i>Éthanol et voitures Flexfuel, Biodiesel et autre biomasse</i>	<i>47</i>
<i>Sables bitumineux et pétrole lourd</i>	<i>48</i>
<i>Hydrogène</i>	<i>49</i>
<i>Autres alternatives</i>	<i>50</i>
CONCLUSION	50
CONCLUSION DU RAPPORT	51
BIBLIOGRAPHIE	53
<i>Information en français</i>	<i>53</i>
<i>Information en anglais</i>	<i>54</i>

Table des illustrations

FIGURE 1 : COURBE DE HUBBERT, SOURCE WIKIPÉDIA	9
FIGURE 2 : SCHÉMA DE FORAGE HORIZONTAL À CONTACT MAXIMUM.....	12
FIGURE 3 : RÉSERVES DE PÉTROLE DÉCLARÉS PAR LES PAYS DE L'OPEP.....	13
FIGURE 4 : GRAPHIQUE SIMPLIFIÉ DE LA DEMANDE ET DE LA PRODUCTION D'UN PAYS.....	16
FIGURE 5 : PRODUCTION VERSUS LE NIVEAU DE DÉCOUVERTES	18
FIGURE 6 : PERSPECTIVES DE PRODUCTION DE LIQUIDES 2005-2100	20
FIGURE 7 : MODÈLE DE DÉPLÉTION DU PÉTROLE : GBM SOUS DEUX OU TROIS CHOCS ET EFFETS DES PRIX... 21	
FIGURE 8 : PRIX DU BARIL DE PÉTROLE US\$/BARIL.....	23
FIGURE 9 : PRIX DE L'OR EN US\$/ONCE	23
FIGURE 10 : PRIX DE L'ALUMINIUM EN CENT US/LIVRE	24
FIGURE 11 : PRIX DU CUIVRE (COMEX) EN CENT US/LIVRE.....	24
FIGURE 13 : SYSTÈME DE L'ÉCONOMIE ÉCOLOGIQUE ÉTENDU.....	34
FIGURE 14 STOCK BRUT D'ÉQUIPEMENT PER CAPITA	35
FIGURE 15 : STOCK BRUT DE STRUCTURES NON RÉSIDENTIELLES	36
FIGURE 16 : CONSOMMATION D'ÉNERGIE PRIMAIRE PER CAPITA	36
FIGURE 17 : PIB PAR HEURE/PERSONNE	37
FIGURE 18 : HEURES TRAVAILLÉES PAR PERSONNES ANNUELLEMENT.....	37
FIGURE 19 : PIB AMÉRICAIN RÉEL ET MILES PARCOURUS EN VÉHICULE AU TOTAL.....	38
FIGURE 20 : VARIATION ANNUELLE DU PIB ET DES MILES EN POURCENTAGE	39
FIGURE 21 : PIB PAR MILE PARCOURU SUR AUTOROUTE (EN DOLLARS US DE 2000).....	39
FIGURE 22 : CONSOMMATION AMÉRICAINE PAR SECTEUR 1973-2003	44

Index des tableaux

TABLEAU 1 : EXEMPLE DE PROBABILITÉ DES RÉSERVES DE PÉTROLE D'UN CHAMP.....	14
TABLEAU 2 : ESTIMATIONS DES PRIX DU PÉTROLE	25
TABLEAU 3 : PRIX DU BARIL DE PÉTROLE, SELON LE GOUVERNEMENT DU QUÉBEC.....	26
TABLEAU 4 : COMPARAISON DES COÛTS D'UNE CENTRALE PHOTOVOLTAÏQUE ET AU MAZOUT	45

Introduction

Depuis 150 ans la société occidentale a créé une multitude de moyens pour nous faciliter la vie et notre développement et favoriser le développement des connaissances. Depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale, ces développements se sont accentués et plusieurs des organisations et structures que nous connaissons aujourd'hui sont nées dans ces années.

Ce qui a permis cette fulgurante explosion de liberté et de connaissances est la relative stabilité apportée par l'énergie pétrolière disponible à faible coût. Ces développements furent sans contredit bénéfiques pour chaque individu et aussi dans une certaine mesure pour l'ensemble de l'humanité.

Le présent rapport démontre que la production du pétrole va atteindre ou a déjà atteint un pic de production et que par la suite la production va toujours aller en diminuant. C'est vrai par contre qu'il reste encore du pétrole pour 30 ou 40 ans mais sa production sera rendue pratiquement inaccessible financièrement ou physiquement.

Une évaluation sommaire des principaux effets a été effectuée pour pouvoir situer le lecteur à l'égard des implications de cette problématique. Des études plus approfondies produites ultérieurement sur le sujet pourront venir corroborer les conclusions ou les infirmer. Une attention particulière devra donc être apportée à ces futures études.

Même si une quantité assez importante d'informations et de bibliographies existe en anglais, ce rapport est un des rares qui existe en français. Si le lecteur connaît d'autres rapports ou documentations qui ne sont pas déjà dans la bibliographie à la fin, cette information pourra être transmise à l'auteur du rapport.

Ce rapport est divisé en trois sections :

1. L'analyse de la production actuelle du pétrole
2. La consommation d'énergie et la croissance économique
3. Analyse et critique des alternatives et solutions proposés

L'importance du problème de la production du pétrole est tel qu'un bouleversement du mode de vie actuelle est fortement possible dans un avenir immédiat. Il est difficile de prédire avec certitude le moment où ce bouleversement surviendra mais il faut se préparer à cette éventualité dès maintenant.

Section 1 : L'analyse de la production actuelle du pétrole

Principes généraux de production du pétrole

La production du pétrole est assez complexe. Au départ il faut explorer et en trouver et ensuite mettre en place l'infrastructure pour le produire. Matthew Simmons¹ et Kenneth S. Deffeyes² décrivent en profondeur les étapes différentes pour passer de la découverte à l'extraction à grande échelle.

Le pétrole a été formé par la sédimentation des matières organiques végétales et animales de l'époque du Silurien, du Jurassique et du Crétacé. Les couches sédimentaires ont lentement migré vers le bas de la croûte terrestre. La pression, la chaleur et l'absence d'oxygène ont permis les réactions chimiques produisant le pétrole. Pour plus de renseignement sur la formation du pétrole, vous pouvez consulter le site web wikipédia³ qui contient une section très étoffée sur la production du pétrole.

Les endroits où le pétrole est disponible ne sont pas connus avec certitude mais on connaît les formations géologiques où il est inutile de chercher. Peu de régions dans le monde sont susceptibles de contenir des réserves intéressantes de pétrole et la plupart de ces réserves ultimement disponibles ont déjà été découvertes entre 1850 et 1970.

Pour obtenir dans un endroit un *système pétrolier* actif, cinq conditions doivent être réunies (tiré du site web wikipédia) :

1. *« Présence d'une roche source (ou roche mère), strate sédimentaire très riche en matière organique. En général, il s'agit de grès, d'argile, de schiste ou de charbon généré durant l'une des six périodes de fort réchauffement climatique, le jurassique supérieur et l'aptien étant les périodes les plus productives. Les sédiments en question se solidifient en roches poreuses, pouvant se retrouver à plusieurs centaines de mètres de profondeur (jusqu'à trois kilomètres pour les plus profondes).*
2. *Maturité de la roche source : Pour que les matières organiques se transforment en plusieurs phases en eau et en kérogène, puis en pétrole et en gaz, il faut avoir atteint la « fenêtre » nécessaire, en temps et en température.*

Ces hydrocarbures finissent par quitter la roche mère sous l'effet de la pression ; leur faible densité (généralement inférieure à la densité de l'eau) les entraîne vers la surface. Si aucune barrière naturelle ne s'oppose à cette migration, le pétrole peut remonter jusqu'à la surface et y affleurer, d'où une nouvelle condition nécessaire :

3. *Présence d'une roche réservoir, suffisamment poreuse (sables, carbonates ou dolomites sont les réservoirs les plus courants) pour que les hydrocarbures s'y imprègnent. Plus le réservoir est poreux, plus l'extraction sera facile.*
4. *La condition pour que cette couche conserve le pétrole est qu'elle soit surmontée par une couche imperméable, dite de couverture qui peut être une roche comme de l'argile par exemple, ou un dépôt dû à l'évaporation d'eau de mer (sel, gypse) ce sont alors des pièges stratigraphiques.*

¹ Simmons, Matthew, 2005, *Twilight in the Desert: The Coming Saudi Oil Shock and the World Economy*, Wiley

² Deffeyes, Kenneth S., 2005, *Beyond Oil, the view from Hubbert's Peak*, Hill and Wang, New York

³ Wikipédia, Pétrole : <http://fr.wikipedia.org/wiki/P%C3%A9trole>

5. *Pour que les fluides se réunissent en un point, il faut encore qu'il existe une structure piège, c'est-à-dire un dôme dans la surface de contact entre le réservoir et la roche de couverture. Les pièges les plus vastes sont ceux formés par les déformations anticlinales, mais les failles jouent aussi un rôle important. Certains pièges sont directement issus d'anciens éléments du paysage : par exemple, un récif corallien, une fois fossilisé et encastré dans une roche imperméable, peut être une structure piège convenable.*

Si les conditions dynamiques (mouvements des hydrocarbures fluides dans le réservoir) naturelles ou provoquées artificiellement sont favorables, on obtient alors un gisement exploitable. »

On sait donc où chercher le pétrole et où ne pas le chercher. La science géologique est aussi relativement bien développée depuis plusieurs années. Le financement des activités de recherche et de développement dans ce secteur a été relativement suffisant au cours des années.

Il est certain toutefois que l'ensemble du secteur de la prospection du pétrole a subi certaines coupures lors des années 80 et 90 où le prix du baril de pétrole était relativement bas. La production et les réserves existantes ne favorisaient pas la recherche de réserves supplémentaires pour la consommation future. Nous le démontrerons plus tard, même avec un investissement beaucoup plus considérable, il n'est pas certain qu'une augmentation significative des réserves va modifier l'ensemble des prédictions réalistes de la production de pétrole.

Pic de Hubbert

En 1956, un géologue de la compagnie Shell, Marion King Hubbert a calculé que la production de tout puits de pétrole suit une courbe en forme de cloque. La production d'un puits augmente jusqu'à un point, qui est en général atteint lorsque 50% de la réserve a été exploité. Par la suite la production entre dans une phase de déclin plus ou moins prononcée.

La courbe mathématique utilisée pour prédire la production du pétrole est la courbe de Hubbert qui est une dérivée de la fonction logistique⁴

A partir des données disponibles à cette époque, il a calculé que la production de pétrole des États-Unis atteindrait un pic entre 1966 et 1971⁵. Ses calculs étaient basés à partir d'estimations sur la quantité totale de pétrole qui sera ultimement produite. On parle aussi de Réserves Ultimes Récupérables (Estimated Ultimate Recovery, EUR).

Il va sans dire qu'il fut ridiculisé et jusqu'en 1970 on trouvait simplement plein d'objections à cette théorie puisque la production de pétrole augmentait chaque année. Cependant en 1970

⁴ Wikipédia, Courbe de Hubbert : http://fr.wikipedia.org/wiki/Courbe_de_Hubbert

⁵ M. King Hubbert, 1956, Nuclear Energy and the Fossil Fuels, Publication no. 95 Shell Development Company, exploration and production research division, Houston Texas.
<http://www.oilcrisis.com/hubbert/1956/1956.pdf>

la production a atteint un pic malgré toutes les tentatives de maintenir la production à niveau.

À partir de ce point, les États-Unis ont dû importer du pétrole pour couvrir l'augmentation de la demande interne. Une part de plus en plus grande du pétrole consommé dans ce pays depuis 1970 doit être importée.

Le point le plus important de la courbe de Hubbert est le pic, le point où la production du pétrole atteint son plus haut sommet. Avant ce point, la production augmente, ensuite elle diminue inexorablement.

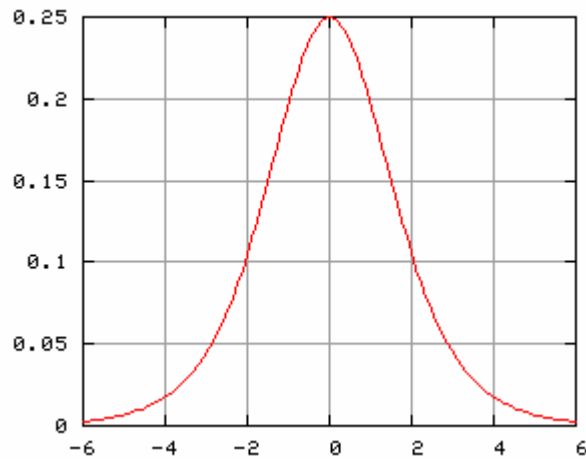


Figure 1 : Courbe de Hubbert, source Wikipédia

Lorsque l'on applique cette méthode sur la production mondiale de pétrole, nous obtenons une courbe similaire quoique non symétrique selon les différents modèles et prédictions. Le point principal est que les réserves ultimes se situent sous la courbe. L'aire de la courbe correspond donc à la quantité globale de pétrole qui sera ultimement extrait. Pour connaître l'étendue de la courbe il faut donc évaluer la réserve ultime. C'est cette estimation qui apporte une certaine incertitude dans la prévision d'atteinte du Pic.

Estimations et prévisions de la production

Plusieurs chercheurs se sont penchés sur des plages possibles d'atteinte du pic de production de pétrole. Voici un tableau de celles qui ont été colligés à partir du World Oil Production & Peaking Outlook⁶

Source de la projection	Date projetée	Expertise, précisions
Experts individuels		
Ali Samsam Bakhtiari	2006-2007	Consultant pour la Iranian Oil Company
Matthew Simmons	2007-2009	Oil Investment Banker ⁷
Chris Skrebowski	2007-2010	Éditeur UK Petroleum Review
Kenneth S. Deffeyes	16 décembre 2005 ⁸	Professeur Émérite en géologie, Université de Princeton
Jean Laherrère	2010-2020	Prospecteur pétrolier pour Total
Peter R. Odell	2060	Professeur Émérite en Étude Énergétique Internationale, Rotterdam
Boone Pickens	2005-2007	Président BP Capital Investment
Michael C. Lynch	Après 2030	Chercheur, M.I.T.
Collin Campbell	2010	Ph. D. Géologie, Administrateur du ODAC ⁹
Sadad Al-Husseini	2015	Directeur de l'exploration et de la production de Saudi Aramco, récemment retraité
Jeremy Gilbert	2010	BP ingénieur pétrolier en chef, retraité
Tom Petrie	Avant 2010	CEO et co-fondateur de Petrie, Parkman et Co, Oil investment bank
Compagnie pétrolière		
CNOOC	2005-2010	China National Offshore Oil Corporation
Total	2020-2025	
Shell	Après 2025	
BP	On ne peut pas savoir	
Exxon Mobil	Après 2030	
Chevron	éminent	Selon site web ¹⁰

⁶ Rembrant H.E.M. Koppelaar, World Oil Production & Peaking Outlook, Peak Oil Netherlands Foundation, November 2005 <http://www.odac-info.org/assessments/documents/ponlreport.pdf>

⁷ <http://www.simmonsco-intl.com/>

⁸ <http://www.princeton.edu/hubbert/current-events-06-02.html>

⁹ Oil Depletion Analysis Center (ODAC) <http://www.odac-info.org/>

¹⁰ Quoique le site ne contienne de prédiction véritable sur le pic de production, il contient beaucoup d'information pour de la sensibilisation sur le sujet et c'est un des premiers site officiel de compagnie pétrolière à parler du sujet <http://www.willyoujoinus.com/>

Source de la projection	Date projetée	Expertise, précisions
Gouvernements		
Hollande	Après 2030	
France	2020-2030	
Firmes d'analyse		
IHS Energy	2011-2020	
Douglas Westwood	2010-2020	
Energy Files	2010-2020	
PFC Energy	2014-2025	
Organisations Aviseurs en énergie		
World Energy Council	Après 2020	
Energy Research Center Netherlands	2010-2035	
CERA	Après 2020	Cambridge Energy Research Associates
ASPO	2010	Association for the Study of Peak Oil
IEA scénario de l'investissement reporté	Autour de 2020	International Energy Association
IEA cas optimiste	Après 2030	
Autres Organisations		
Volvo	2010-2015	
Ford	2005-2010	

Pour ceux qui veulent plus d'information sur les méthodes de calculs utilisées pour obtenir ces différentes estimations, vous pouvez consulter les différents rapports produits par ces experts.

La tendance actuelle est de considérer 2010 plus ou moins 4 ans comme une bonne estimation de l'atteinte du pic de production. Ce qui rend difficile le calcul de ce pic, c'est la façon de calculer les réserves de pétrole. Pour calculer les réserves, il faut connaître l'état des réserves actuelles et l'estimation des découvertes futures.

Les réserves des pays qui ne sont pas membre de l'OPEP (non-OPEP) sont assez faciles à évaluer et les rapports statistiques sont relativement fiables. Pour ce qui est des réserves de l'OPEP, l'information et les rapports gouvernementaux sont considérés peu fiables, voire carrément trompeurs par la plupart des spécialistes.

Il faut comprendre que les entreprises inscrites à la bourse doivent déclarer leurs réserves en fonction des règlements de la Securities and Exchange Commission afin d'éviter les

déclarations trompeuses. Cependant, les réserves de pétrole mondial sont à 80% sous juridiction directe des pays producteurs, sans droit de regard ou de vérification externe.

A cela il faut ajouté que dans les années 80 les pays membre de l'OPEP se sont donnés des quotas de production en fonction de la quantité de réserve disponible dans chaque pays dans le but d'éviter la surproduction. L'abondance de pétrole par rapport a la demande à tendance à faire baisser les prix et affecte directement l'économie des pays producteurs. L'Arabie Saoudite a toutefois compris que les rapports avec les pays consommateurs seraient meilleurs en conservant une stabilité des prix dans une fourchette de 20\$ à 27\$. Ces quotas de productions étaient donc importants pour assurer une stabilité des prix et de la production.

L'imposition de ces quotas a eu un effet néfaste sur l'estimation des réserves pétrolière des pays producteurs. Le rapport de Koppelaar fait état que les annonces d'augmentation de réserves et de découvertes mal déclarés ou surestimés. Le graphique de la figure 3 démontre l'augmentation des réserves dans les années 80 et du fait que les réserves ne diminuent malgré la production annuelle de chacun de ces pays. Koppelaar indique donc que les réserves de l'OPEP ne sont pas fiables. On peut donc affirmer que l'augmentation des réserves de 300 milliards de barils de pétrole est donc douteuse. Toute estimation de la possibilité future d'extraction qui utilise les réserves officielles des pays de l'OPEP contient donc une forte possibilité de surestimation.



Figure 2 : Schéma de forage horizontal à contact maximum

Source : The Oil Drum, 2006 <http://www.theoil Drum.com/story/2006/4/23/12186/9663>

A ces problèmes de déclaration de réserve, il faut ajouter que la production de l'Arabie Saoudite a connu plusieurs problèmes depuis les 30 dernières années. Matthew Simmons rapporte dans son livre l'enquête qu'il a mené en consultant plus de 200 rapports de la

Société des Ingénieurs Pétroliers (SPE) datant de 1970 à 2003. Son livre¹¹ détaille toutes les nouvelles méthodes de production utilisées pour maximiser la production de pétrole en Arabie Saoudite. Les technologies de forage sont avancées comme on peut le voir à la figure 2 et de grandes quantités d'eau salée sont injectées dans les réservoirs pour augmenter la productivité des puits.

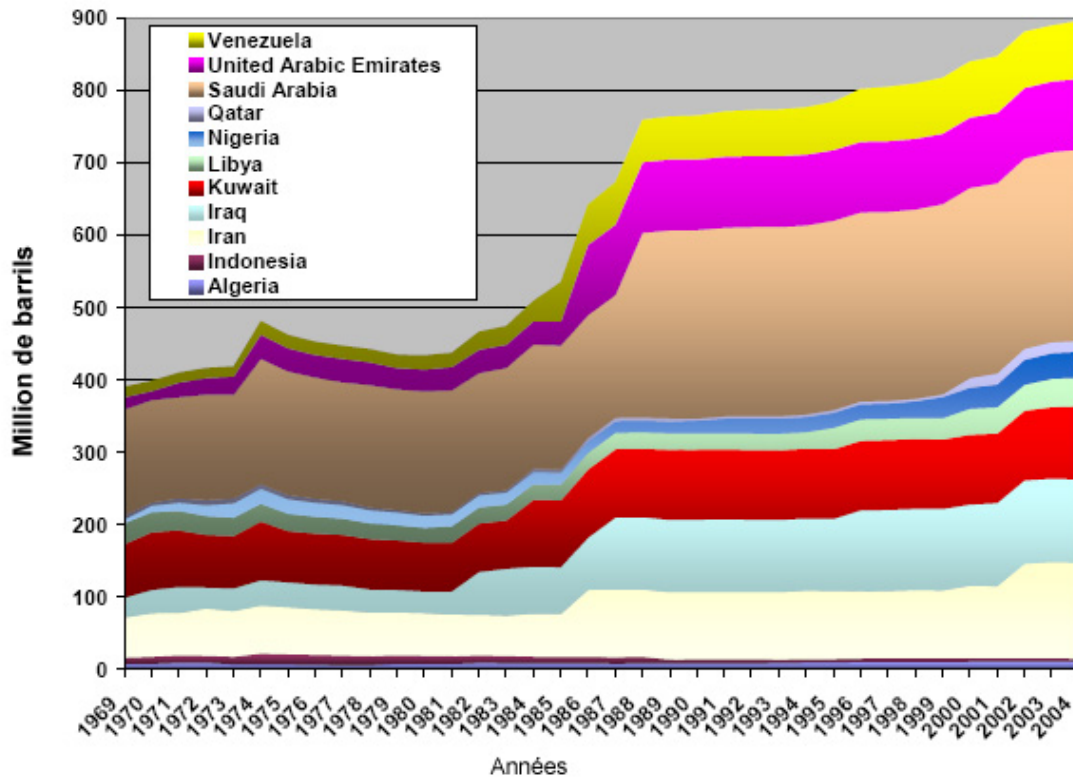


Figure 3 : Réserves de pétrole déclarés par les pays de l'OPEP¹²

Source : Koppelaar, 2005

Cette amélioration de la productivité n'a pas permis d'augmenter les réserves mais seulement d'en augmenter la quantité produite par jour. Simmons indique même que cela entraîne une diminution de la quantité totale qui pourra être extraite des réservoirs de l'Arabie Saoudite. Simmons publie régulièrement les présentations qu'il fait auprès de groupes d'intérêt sur le site web de son entreprise : <http://www.simmonsco-intl.com/>.

Difficultés et différences dans les estimations

L'estimation de la courbe de production du pétrole serait assez simple en général pour une région ou un pays donnée. Il est cependant difficile d'effectuer une étude statistique

¹¹ Simmons, Matthew, 2005, *Twilight in the Desert: The Coming Saudi Oil Shock and the World Economy*, Wiley

¹² Rembrant H.E.M. Koppelaar, World Oil Production & Peaking Outlook, Peak Oil Netherlands Foundation, November 2005 <http://www.odac-info.org/assessments/documents/ponreport.pdf>

satisfaisante pour l'ensemble de la planète. Les problèmes se situent à deux niveaux. Premièrement au niveau du calcul de l'estimation en soi et ensuite au niveau de la publication des chiffres de réserves peu fiables par la plupart des pays de l'OPEP.

Byron King¹³ illustre bien la difficulté physique de l'évaluation des réserves d'un champ de pétrole. On doit prendre un nombre important de mesures et tenir compte d'une grande quantité de facteurs. De plus, on ne peut jamais vraiment voir comment se constitue la structure géologique du puits. J'ai traduit ici la description des méthodes d'estimations de King¹⁴:

« Quand vient le temps d'estimer les réserves de pétrole, vous mettez en place les meilleures techniques de génie possible. Vous étudiez tous les échantillons qui viennent du fond du trou. Vous amassez toutes les données possibles. Vous dépensez autant d'argent que vous pouvez vous permettre pour bien faire les choses. Vous calculez toutes les données. Vous ajustez tous les chiffres aux plus belles courbes que vous pouvez dessiner. Ensuite vous faite une estimation! »

A part ces difficultés techniques, il y a des différences dans la façon d'annoncer les chiffres de réserves selon les producteurs. Les réserves de pétrole sont chiffrées à partir de probabilités que l'on dénote P. En général il y a toujours une plus faible probabilité d'une grande réserve de pétrole.

Probabilité	Quantité
P10 (10% sûr)	500 Milliard de barils
P50 (50% sûr)	100 Milliard de barils
P90 (90% sûr)	50 Milliard de barils

Tableau 1 : Exemple de probabilité des réserves de pétrole d'un champ

Pour la probabilité P90 on parle souvent de réserves prouvées. Pour une probabilité P70 on indique que c'est une réserve probable et enfin pour une probabilité inférieure à P30 ou P40 on parle de réserve possible.

Une entreprise ou un pays peut donc annoncer une grande réserve de pétrole mais ne pas indiquer explicitement à quel niveau de situe la probabilité. Notons que la SEC (Securities and Exchange Commission) demande que l'état des réserves des compagnies pétrolières cotées en bourse indique clairement le niveau de réserve et la probabilité de celles-ci dans des formulaires obligatoires. Les données disponibles pour les réserves d'entreprises sont donc très fiables et bien documentés.

Les règles de la SEC ne s'appliquent pas pour les pays de l'OPEP et les pays qui ont nationalisé la production. Comme ils n'ont pas besoin d'investissement extérieur en capital, ils ne sont pas sujets à la réglementation de la SEC. Les pays ont donc tendance à camoufler et surestimer l'état réel des réserves. Pour ajouter au problème notons que les pays qui

¹³ <http://www.whiskeyandgunpowder.com/Archives/20060203.html>

On peut retrouver l'article à cette autre adresse :
<http://www.energybulletin.net/12617.html>

¹⁴ Idem

approchent le stade de déplétion type 3 tentent de cacher le plus possible la réalité des réserves et des coûts de production, autant en énergie qu'en dollars.

Les types de déplétion de Chris Skrebowski

Chris Skrebowski¹⁵ décrit 3 types de déplétions de pétrole et utilise une très bonne analogie pour les décrire. Il faut tout de suite prendre en compte que dès que le premier baril de pétrole est pompé d'un réservoir il débute la première phase de déplétion.

Déplétion de type 1 : Dans tous les cas, un puits voit sa production augmentée jusqu'à ce que la moitié de la production totale estimée soit atteinte pour ce puits. Par la suite la production entre dans une phase de déclin, jusqu'à ce que ce ne soit plus viable économiquement ou énergétiquement. On doit donc creuser un autre puits dans le même réservoir pour faire en sorte que la production totale du réservoir augmente toujours.

Comme analogie, on peut prendre l'exemple d'un bar. Chaque fois que l'on commande une bière en fût, elle nous est servie à partir d'un baril qui est plus ou moins plein. Lorsque ce fût est presque vide, on change de baril et personne ne s'en rend compte, les personnes dans le bar peuvent toujours boire tranquillement. Il peut arriver que pendant ce changement on vous demande d'aller chercher votre bière à un autre comptoir ou à un autre étage. Cela n'apporte qu'un léger désagrément mais vous demeurez toujours dans le même bar.

La déplétion de type 1 est un phénomène qui arrive depuis le début de l'ère pétrolière et est très bien compris par tous.

Déplétion de type 2 : Lorsque tous les puits d'un champ de pétrole voient leur production totale en déclin, on est en phase de déplétion de type 2. Pour conserver la production totale de la région ou du pays on doit alors trouver un autre gisement et débiter la production dans ce gisement pour éviter une baisse de la production totale du pétrole.

Dans notre analogie du bar, c'est le cas où presque tous les barils de bière sont vides dans le bar et que le livreur ne peut se présenter prochainement. L'aubergiste peut toujours accueillir quelques clients mais il demandera à certains d'aller dans un autre bar. Cela cause quelques désagréments mais ce n'est pas vraiment important, vous avez toujours de la bière pour boire.

La déplétion de type 2 est donc appliquée à un champ pétrolier dans son ensemble. Ce type de déplétion est bien étudié et documenté par les experts.

¹⁵ Tiré d'un article du Oil Depletion Analysis Center : Chris Skrebowski est un des sept membres du Conseil d'administration de l'ODAC et l'éditeur de *Petroleum Review*, un magazine mensuel publié par l'Energy Institute de Londres. Il était auparavant l'éditeur de *Petroleum Economist* et était un analyste du marché pour les Saoudiens à Londres pendant huit ans. Il a débuté sa carrière dans l'industrie pétrolière en tant que planificateur à long terme pour BP, ensuite il joint *Petroleum Times* comme journaliste et édité le magazine *Offshore Services* dans les années 70.

Déplétion de type 3 : Cette phase de déclin de production s'applique à toute une région ou à un pays en entier. En général on parle plus souvent du pays en entier. M. King Hubbert avait prédit en 1956 que la déplétion de type 3 pour les États-Unis se produirait entre 1966 et 1971. Tel que prévu elle se produisit en 1970. Dans ce cas spécifique un pays cesse d'augmenter sa production totale. Il se peut qu'il puisse y avoir une production excédentaire par rapport à sa consommation nationale, selon le niveau de production atteint à son pic. Éventuellement le double effet de l'augmentation de la demande et de la diminution de la production nationale engendrera une demande de pétrole importé. Le pays devient donc importateur net de pétrole.

En poursuivant avec notre analogie du bar, c'est un peu comme si tous les bars de votre région ne peuvent suffire à la demande et qu'il ne soit pas possible, même en construisant d'autres bar, d'obtenir plus de bière.

Vous pouvez voir le phénomène de déplétion de type 3 à la figure 4. Au départ l'augmentation de production est légère mais à mesure que les connaissances globales et que l'économie du pays s'améliorent on devient meilleur pour pomper le pétrole contenu dans l'ensemble des réserves du pays.

La demande du pétrole suit une courbe à peu près semblable à la production et on peut voir qu'elle s'apparente à un pays qui ne connaîtrait pas de baisse de la demande. Une baisse de la demande survient lorsque l'économie est en récession. A la figure 4 nous avons exclu les aléas des récessions ou dépressions, ce qui en fait quand même un portrait général assez bon.

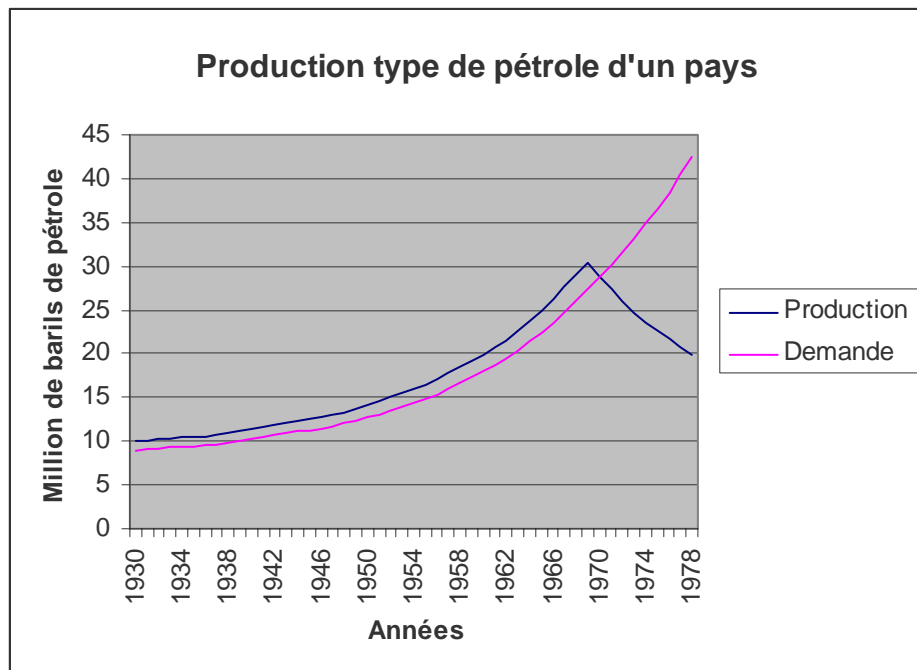


Figure 4 : Graphique simplifié de la demande et de la production d'un pays

La production actuelle du pétrole

Collin, Campbell et Laherrère ont produit des études qui prennent en compte les chiffres initiaux publiés pour les découvertes de puits de pétrole d'une certaine taille. Pour Campbell deux questions seulement sont nécessaires pour évaluer les quantités de pétrole disponibles :

- « *Combien en a-t-on trouvé?*
- *Quand a-t-il été trouvé?*¹⁶ »

Il est tout à fait normal de calculer la production future de pétrole à partir des découvertes. On a vu plus haut que « le pétrole doit être découvert avant d'être produit.¹⁷ » La courbe de production sera donc la résultante des découvertes antérieures. Pour estimer la production totale, Campbell¹⁸ indique ce que l'on doit savoir¹⁹ :

1. « *Combien est-ce qu'il s'en est produit de pétrole à ce jour (Production cumulée);*
2. *Les estimations de ce qu'il reste à produire à partir champs existants (Réserves); et*
3. *Les estimations de ce qu'il pourra être produit à partir de nouveaux champs (à découvrir)*
4. *La disponibilité totale, étant la somme de chaque de ces éléments (Réserves Ultimes) »*

¹⁶ Campbell, Collin J., 2002 FORECASTING GLOBAL OIL SUPPLY 2000-2050, M. King Hubbert Center for petroleum studies, Colorado. p. 1
http://hubbert.mines.edu/news/Campbell_02-3.pdf

¹⁷ *Ibid*

¹⁸ *Ibid*

¹⁹ Les propos sont traduits par l'auteur, l'original peut être consulté pour plus de justesse.

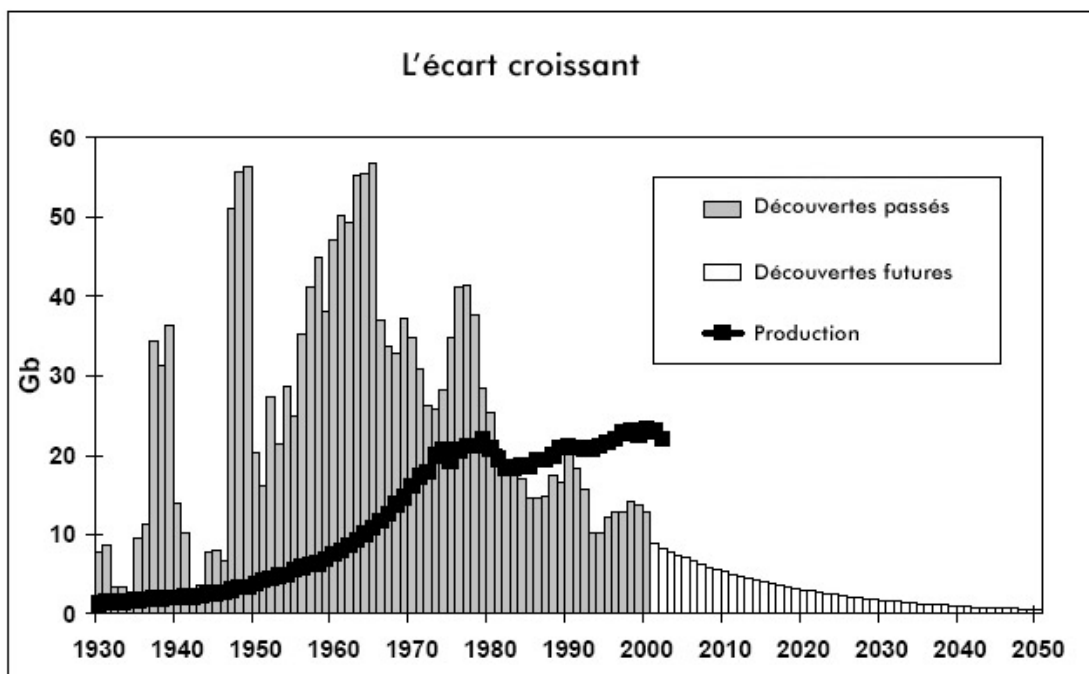


Figure 5 : Production versus le niveau de découvertes²⁰

Source : Campbell, 2003

Collin, Campbell, Koppelaar, Deffeyes et Laherrère utilisent tous la méthode de calcul mis de l'avant par M. King Hubbert. Seul les méthodes d'estimation de la Réserve Ultime diffèrent. Pour calculer cette Réserve Ultime on se base sur les découvertes antérieures et sur la tendance des découvertes futures.

A la figure 5 on peut voir les découvertes annuelles en milliard de barils et la production annuelle en milliard de barils. Ce que l'on peut constater c'est que la production annuelle à atteint un plateau dans les années 70 et qu'elle a graduellement augmenté depuis les années 80 mais beaucoup moins rapidement que dans les années précédentes 1970. La principale raison est la création de l'OPEP et la réduction de 25% de la production de l'Arabie Saoudite en 1973. En 1979 la chute de production est due à l'embargo de l'Iran en protestation à la révolution iranienne, à la guerre du Yom Kippour et à l'invasion de l'Iran par Saddam Hussein. Saddam Hussein était soutenu par les Américains et l'Iran par l'URSS.

La baisse de production des années 90 est la résultante de l'atteinte du pic pétrolier en Russie et à la chute subséquente de l'empire soviétique. La production de pétrole ne pouvait plus être augmentée et les revenus d'exportation du pétrole ont sans cesse diminué. La production a finalement augmenté mais on est encore très loin de la fulgurante augmentation des années 60.

²⁰ Campbell, Collin J., 2003 The Heart of the Matter, The Association for the Study of Peak Oil and Gas, <http://www.hubbertpeak.com/campbell/TheHeartOfTheMatter.pdf>

De nombreux spécialistes, en particulier Koppelaar (2005), indiquent qu'il existe de grandes incertitudes sur la quantité de pétrole mondiale. On pense en particulier aux données de réserves peu fiables des pays de l'OPEP et même de pays comme le Mexique. Les vraies données sur les réserves seront connues lorsqu'il y aura des fuites de la part de personnes qui viennent de quitter le milieu dans les pays respectifs. Afin d'élargir le débat et l'étendue des estimations, Koppelaar²¹ propose de prendre en considération les points suivants :

1. *« Le taux de déclin net pour le monde. La quantité totale de déclin de production par année pour les champs et pays qui ont déjà passé le pic.*
2. *La quantité de production qui proviendra de nouvelles découvertes pouvant subvenir.*
3. *La quantité de production qui peut provenir de réserves connues mais qui ne sont pas encore en production.*
4. *La quantité de production qui peut provenir de l'implantation de nouvelles technologies et découvertes.*
5. *La quantité de production qui peut provenir de pétrole non conventionnel. »*

Les calculs de Koppelaar tiennent aussi compte de la production de pétrole non conventionnel tel que le pétrole lourd sulfureux et les sables bitumineux. Ces calculs pointent vers un pic en 2012 avec un plateau débutant en 2010. Koppelaar indique que la production du pétrole de qualité Light Sweet Crude selon l'OPEC Monthly Oil Market²² a probablement déjà atteint un pic. Ce sont les autres calibres (pétrole de moindre qualité) qui permettent de répondre à la demande.

Koppelaar introduit les notions de production dans un monde turbulent qui peut avoir une influence sur le pic de production. Étant donné que des baisses de production sont à prévoir pour certains événements futurs, le pic de production se trouve à être reculé dans le temps. On voit donc que la demande et la production peuvent être influencées par de nombreux facteurs et qu'il est difficile de tracer une courbe de production fidèle à la réalité.

²¹ Rembrant H.E.M. Koppelaar, World Oil Production & Peaking Outlook, Peak Oil Netherlands Foundation, November 2005 <http://www.odac-info.org/assessments/documents/ponlreport.pdf>

²² OPEC Monthly Oil Market - <http://www.opec.org/home/Monthly%20Oil%20Market%20Reports/2005/MR082005.htm>

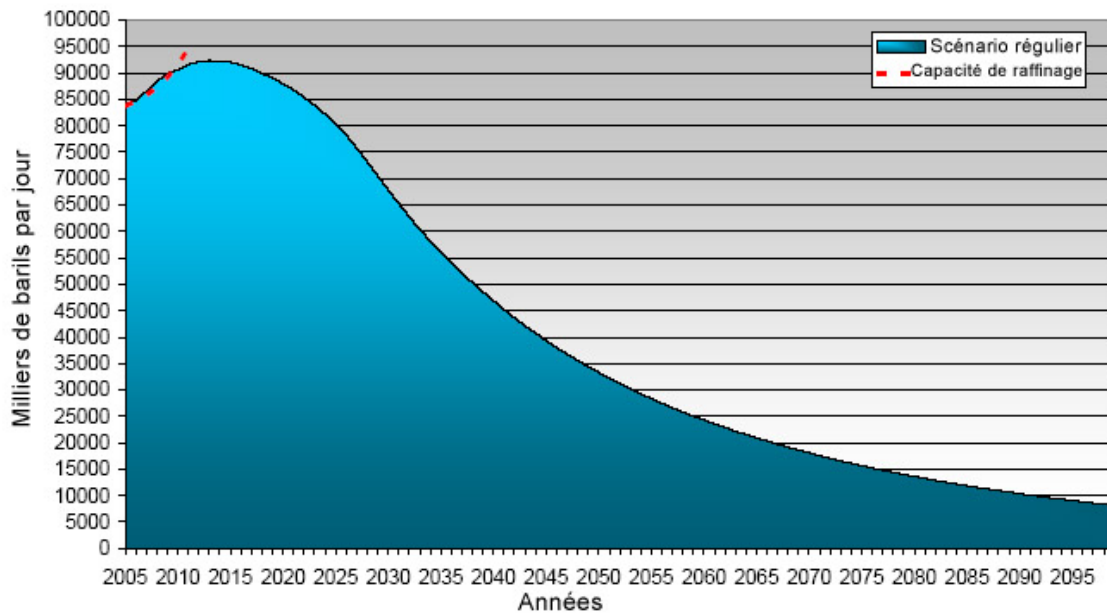


Figure 6 : Perspectives de production de liquides 2005-2100²³

Source : Koppelaar, 2005

Le Modèle Bass Stochastique – Filtre de particule

Certains physiciens prennent une autre méthode de calcul afin de prédire les courbes de production des pays. Samuel Foucher²⁴ explique bien les méthodes à partir du Modèle Bass Stochastique avec Filtre de particule (MBS-FP). Dans son site web plusieurs méthodes avancées de calculs de la courbe de production sont présentées.

Foucher prend en considération non seulement la capacité de production des pays mais aussi la demande interne. Un pays à la capacité d'exporter que si la demande interne le permet. Il faut donc avoir une bonne idée de l'évolution possible de la demande et de la production d'un pays.

La méthode de calcul de Foucher est graduellement appliquée à la production de différents pays exportateurs. Guseo, Dalla Valle et Guidolin²⁵ ont utilisés la méthode du Modèle Généralisé de Bass pour trouver une estimation du pic pétrolier en 2007 et une déplétion de 95% en 2023.

²³ Rembrant H.E.M. Koppelaar, World Oil Production & Peaking Outlook, Peak Oil Netherlands Foundation, November 2005 <http://www.odac-info.org/assessments/documents/ponreport.pdf>

²⁴ Foucher, Samuel (2006). How to track an oil production curve, <http://graphoilogy.blogspot.com/2006/02/how-to-track-oil-production-curve.html>

²⁵ GUSEO, R., DALLA VALLE, A. and GUIDOLIN, M. (2005). World Oil Depletion Models: Price Effects Compared with Strategic or Technological Interventions <http://homes.stat.unipd.it/guseo/Ms05jecm.pdf>

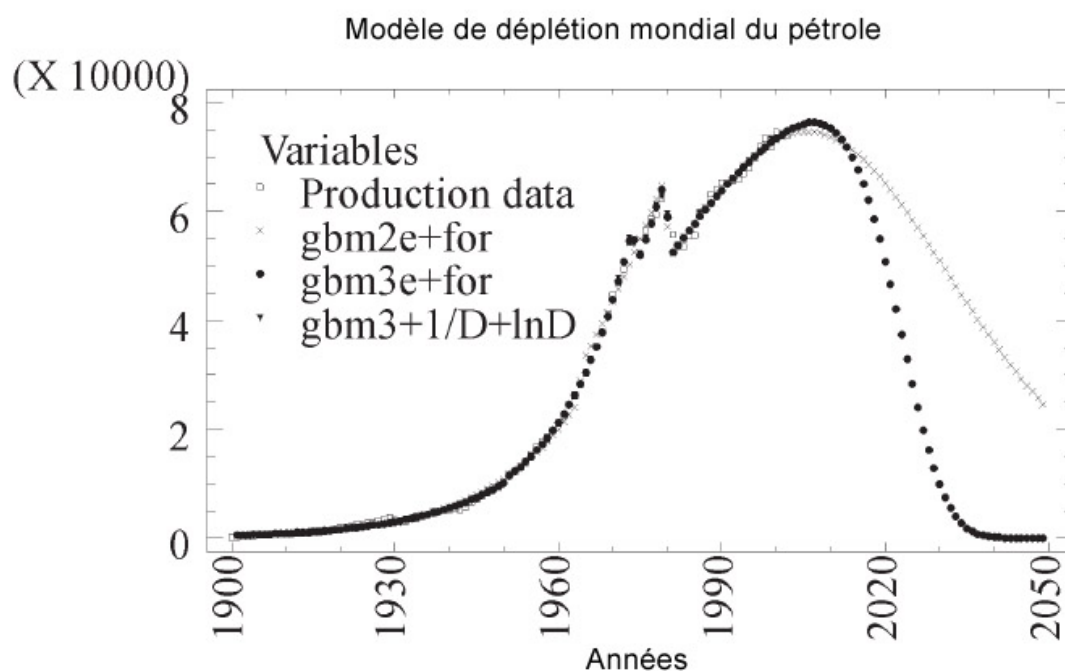


Figure 7 : Modèle de déplétion du pétrole : GBM sous deux ou trois chocs et effets des prix.²⁶

A la figure 7 nous pouvons voir la superposition de quatre différentes courbes. Il y a la courbe de production réelle jusqu'en 2005 (les carrés). Les trois autres courbes sont des courbes calculées à partir de la méthode GBM. On peut voir que la méthode GBM permet de modéliser les chocs exponentiels des années 70 et 80.

Les barrières techniques, politiques et humaines

Les différents scénarios de production qui estiment une production de 120 millions de barils par jour sont considérés optimistes même par les spécialistes et les plus hauts dirigeants du milieu pétrolier. Matthew Simmons a indiqué dans sa présentation « Today's Energy Reality : "we are in a deep hole" » qui s'est tenue lors d'une conférence sur le pétrole et le gaz le 7 décembre 2005 que la capacité était utilisée à 100% pour les éléments suivants : « *puits, traitement du pétrole et du gaz, plate-formes de forage, capacité de raffinage et le personnel*²⁷. »

²⁶ *Ibid*

²⁷ Matthew, Simmons, 2005 *Today's Energy Reality: "We Are In A Deep Hole"* Deloitte 2005 Oil and Gas Conference Houston, Texas
<http://www.simmonsco-intl.com/files/Deloitte%202005%20Oil%20and%20Gas%20Conference.pdf>

Plus récemment le Times de Londres a publié une entrevue le 8 avril 2006²⁸ de Christophe de Margerie, chef de l'exploration chez Total (TotalElfFina) et probablement le futur Chef de l'exploitation (CEO) de Total. Dans cette entrevue, Monsieur de Margerie a indiqué que :

« Les gens ne sont pas capables de faire face à la réalité du prix, qui n'a rien à voir avec les spéculateurs ou même d'un manque de réserves, qui sont amples. « C'est un problème de capacité et de synchronisme » indique de Margerie. « C'est le vrai problème du pic pétrolier ».

[...]

Il n'y a pas de perspectives d'atteindre les pics élevés que les économistes de l'Agence Internationale de l'Énergie prédisent qu'il sera nécessaire pour satisfaire la demande mondiale pour le pétrole. Il n'y a pas assez d'ingénieurs, de plate-forme, de pipeline et de foreur pour augmenter le rendement mondial actuel de 85 millions de barils par jour à 120 millions de barils par jour, indique-t-il. »

Ces deux affirmations indiquent donc des problèmes réels de capacité dans l'industrie pétrolière et du raffinage. A cela il faut ajouter le fait que le pétrole lourd et sulfureux qui est de plus en plus utilisé requiert une méthode de raffinage et de traitement très différente du pétrole léger. Le pétrole lourd est aussi plus coûteux à extraire car il est comme de la mélasse. On doit le chauffer pour le liquéfier avant de l'extraire. Il n'existe qu'une faible capacité de raffinage du pétrole lourd dans le monde. Le site web the Oil Drum (www.theoil drum.com) contient un article assez détaillé sur les opérations nécessaires pour *craquer* le pétrole lourd²⁹.

Pour ajouter au problème la récente explosion des prix des matières premières est un frein à l'investissement et à la construction de projets pétroliers d'envergure. Dans un article paru dans Schlumberger³⁰ le 7 avril 2006, le Ministre du Pétrole Qatar indique³¹ : « Nos coûts ont triplés depuis 2 ans, dû aux prix élevés [des commodités]. Et ce n'est pas juste cela, c'est aussi les entrepreneurs qui ont triplé leurs prix » Pour illustrer l'augmentation des prix des matières premières, les graphiques suivants sont tirés du site web Daily Kos³² d'un article de Jérôme à Paris.

²⁸ Carl Mortished, Oilman with a Total solution, Times Online 8 avril 2006, United Kingdom
<http://business.timesonline.co.uk/article/0,,8210-2124075,00.html>

²⁹ Heading Out, Cracking oil is not a funny business, 26 mars 2006, The Oil Drum
<http://www.theoil drum.com/story/2006/3/26/125439/544>

³⁰ Schlumberger est un chef de file comme fournisseur de service pour les champs pétrolifères.
<http://www.slb.com/index.asp>

³¹ Selina Williams et Sally Jones, OPEC Warns High Commodity Prices May Kill Oil Projects, Schlumberger, 7 avril 2006
<http://realtimenews.slb.com/news/story.cfm?storyid=632591>

³² Daily Kos est un blog spécialisé dans l'analyse des facteurs macroéconomiques émergents.
<http://www.dailykos.com/>



Figure 8 : Prix du baril de pétrole US\$/baril

Source : www.freecharts.com



Figure 9 : Prix de l'or en US\$/once

Source : www.freecharts.com

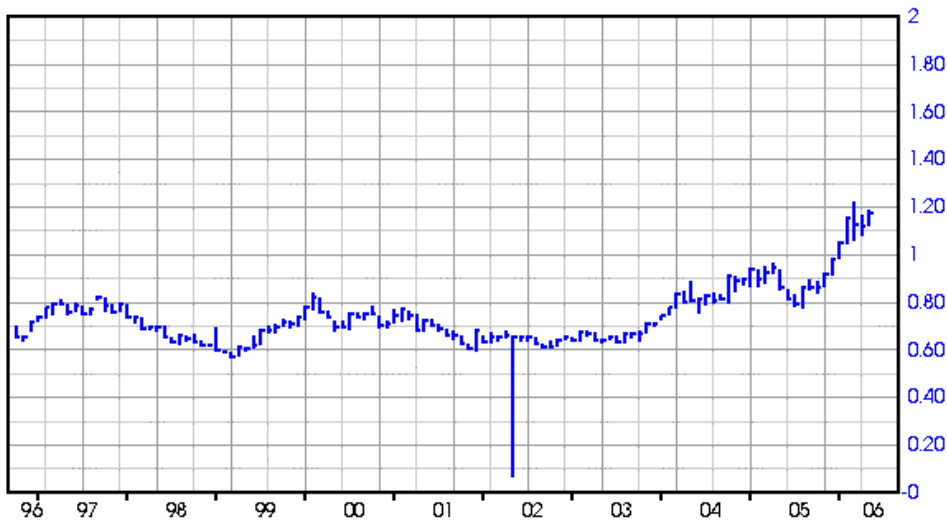


Figure 10 : Prix de l'aluminium en cent US/livre

Source : www.freecharts.com



Figure 11 : Prix du cuivre (COMEX) en cent US/livre

Source : www.freecharts.com

Vous voyez donc l'augmentation des prix des commodités presque en simultané. Il est à noter que le prix du cuivre est élevé pour deux raisons. Une grève chez Grupo Mexico empêche la livraison des commandes. De plus les prix élevés de la dernière année ont incité les transformateurs et acheteurs industriels à utiliser les stocks existants. Les entrepôts ont été vidés des stocks en attendant une baisse des prix anticipés. Le problème est que la demande a continué de progresser et que les producteurs n'ont pas augmenté la production parce que leurs propres stocks n'étaient pas diminués. L'augmentation de la production ne sera pas facile à terme non plus parce que la production du cuivre demande beaucoup de capital et d'énergie. Dans le cas de l'énergie, le présent rapport fait état des différents problèmes de capacité mondiale.

Conclusion

Pour conclure, on peut voir que la production de pétrole entre dans une phase de déclin d'ici les 4 ou 5 prochaines années. Les résultats de nombreuses analyses pointent tous vers une même tangente, seules certaines difficultés d'estimations font en sorte de donner des dates de pic du pétrole différentes.

Il est certainement possible que le pic de production du pétrole léger (Light Sweet Crude) soit déjà atteint. L'augmentation de production ne sera prochainement plus possible et les effets économiques seront certainement très importants.

Lorsque les États-Unis ont atteint leur pic de production, ce n'est que 2 ou 3 ans après que ce fut confirmé. De même en URSS, la chute est survenue en 1989 mais le pic a été atteint en 1984. Pour un pic mondial, les effets et les problèmes possibles ne sont pas connus avec certitude. Il est vraisemblable que les marchés ne soient pas en mesure de donner un signal d'alarme suffisant pour permettre une conversion de l'économie et du mode de vie actuel.

L'explication actuelle du niveau élevé des prix du pétrole est souvent donnée par les tensions en Iran et au Venezuela ainsi que les problèmes au Niger. On met aussi l'augmentation du prix sur les capacités de raffinage limitées dans le monde. On parle de prime de risque de 10\$ à 15\$ selon les différents experts. Il est vrai que toutes ces tensions donnent des raisons pour le soutien des prix élevés malgré un niveau de stockage de brut important dans les pays industrialisés. En temps normal les prix seraient attirés vers une fourchette de 40-50\$ ce qui ne sera probablement plus jamais le cas.

Koppelaar³³ nous a produit le tableau des prévisions des prix du pétrole suivant :

	2006	2007	2008	2009	2010
Gouvernement Holandais ³⁴	50 dollars	27 dollars	27 dollars	27 dollars	27 dollars
CIBC ³⁵	84 dollars	93 dollars	80 dollars	90 dollars	101 dollars
Goldman Sachs ³⁶	74 dollars	103 dollars	135 dollars	Inconnu	Inconnu
Beyond Petroleum ³⁷	40 dollars	40 dollars	40 dollars	40 dollars	40 dollars
International Energy Agency ³⁸	52 dollars	51 dollars	49 dollars	48 dollars	47 dollars

Tableau 2 : Estimations des prix du pétrole

Source Koppelaar, 2005.

³³ Rembrant H.E.M. Koppelaar, World Oil Production & Peaking Outlook, Peak Oil Netherlands Foundation, November 2005 <http://www.odac-info.org/assessments/documents/ponlreport.pdf>

³⁴ Ministère des Affaires Économique, Hollande, *Nu voor later, Energierapport 2005*, 2005

³⁵ CIBC, *Indicateur Mensuel*, Avril 2005

³⁶ Goldman Sachs, *Superspike report*, Mars 2005

³⁷ BBC News <http://news.bbc.co.uk/1/hi/business/4406054.stm>

³⁸ International Energy Agency, *World energy Outlook 2005*, 2005

Il est raisonnable de penser que les effets de la faible marge de manœuvre de production du pétrole vont avoir un effet sur l'économie mondiale avant même l'atteinte du pic pétrolier.

En juillet 2005 le gouvernement du Québec a produit une révision de l'analyse de l'évolution de la demande énergétique au Québec. L'étude est exhaustive et comporte les chiffres de consommation pour toutes les formes d'énergies confondus. On y parle de la consommation d'électricité, de pétrole, de gaz naturel et de la biomasse. Quoiqu'il en soit, l'espace ne nous permette pas de montrer l'ensemble des conclusions de cette étude, elle est assez exhaustive au niveau de la consommation.

Selon le document, « *Les hypothèses sur l'évolution des grands secteurs d'activité économique sont fournies par la firme Informetrica Limited d'Ottawa. Les travaux de cette firme sont utilisés notamment par le ministère des Ressources naturelles du Canada et l'Office national de l'énergie dans leurs propres travaux de prévisions.* »³⁹

L'étude prévoit une augmentation modérée du prix du baril de pétrole en tenant compte de prévisions du ministère de l'énergie américain (Energy Information Administration) qui étaient publiés dans Energy Outlook 2004. On indique même que le taux de change favorable va diminuer le coût d'achat réel des raffineurs à Montréal. Le tableau 3 indique les prévisions des prix du pétrole selon cette étude.

	Dollars de 2001			
	2001	2006	2011	2016
Prix du WTI à Chicago \$ US	24,19	35,01	26,36	27,16
Prix moyen à Montréal \$ CA	38,36	44,16	34,23	35,43

Tableau 3 : Prix du baril de pétrole, selon le gouvernement du Québec
Source : Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 2005

On peut déjà affirmer que la prévision du prix du baril de pétrole pour 2006 ne sera jamais atteinte. Pour ce qui est de 2011 et 2016, ces estimations sont très improbables. La banque CIBC avance un prix probable de 101 dollars et Goldman Sachs ne s'aventure pas plus loin que 2008.

Le gouvernement du Québec n'envisage donc pas de problème au niveau de l'approvisionnement en pétrole dans les prochains 10 ans. Ce que même les compagnies pétrolières tendent à confirmer. Il faudra donc un effort considérable pour mettre de l'avant cette notion au niveau de la politique et des médias du Québec.

³⁹ Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, *Évolution de la demande d'énergie au Québec* juillet 2005, <http://www.mrmf.gouv.qc.ca/energie/energie/energie-prevision.jsp>

Section 2 : La consommation d'énergie et la croissance économique

La croissance économique selon la macroéconomie néoclassique

Depuis le début de l'ère industrielle ce qui caractérise l'ensemble de la production c'est un accès toujours plus grand à une source d'énergie à peu de frais. L'occident a fait un bon considérable lorsque qu'elle a débuté à exploiter le charbon et cette lancée c'est poursuivie avec le pétrole.

Il est donc normal et compréhensible que les théories et les postulats pour l'explication de la croissance économique et de l'accumulation du capital ne traite que superficiellement de l'énergie. Pendant longtemps le coût en capital pour obtenir cette énergie était négligeable et disponible chaque année en plus grande quantité pour satisfaire les besoins.

Le progrès technique et le taux de croissance soutenu sont liés dans cette théorie. Le progrès technique représente l'état d'avancement de la connaissance qui permet de trouver de nouveaux moyens de production et d'accélération de la production. C'est en partie vrai puisque chaque amélioration d'une méthode de production, d'un produit ou d'une machine permet une augmentation de la productivité par travailleur ou pour un capital donné.

La formule de base de cette théorie est la suivante⁴⁰ : $Y = f(K, AN)$. Cette théorie est probablement apportée dans tous les manuels d'introduction à la macroéconomie et le lecteur pourra consulter une bibliographie étendue sur le sujet pour de plus amples détails sur les fondements de cette théorie.

La consommation d'énergie et la croissance économique

La formule de base pour expliquer la croissance⁴¹ est $Y = f(K, AN)$ en incluant la composante du progrès technologique A . Cette formule, quoique intéressante ne permet pas d'expliquer pourquoi il n'y a presque pas eu de croissance dans les débuts de l'humanité et pourquoi la croissance diminue dans certaines conditions.

La théorie néoclassique de la croissance économique explique difficilement pourquoi la croissance a diminué subitement en 1973. Il est difficile d'imaginer que les scientifiques, les entreprises et l'ensemble de l'économie décident d'un commun d'accord de limiter le progrès technologique et ainsi limiter la croissance.

⁴⁰ O. Blanchard et D. Cohen, Macroéconomie 3^e édition, Pearson Education 2004

⁴¹ idem

Il faut donc décrire d'une manière différente cette croissance économique. Il existe un moyen facile d'expliquer ce phénomène en modifiant légèrement un des éléments de la formule de base.

1. $Y = f(K, EN)$

Y = Production

K = Capital

N = Travail humain

E = Énergie

Le progrès technologique est souvent considéré en fonction des résultats produits en fonction des intrants du système. Dans ce système l'énergie n'est pas vraiment considérée ou comme un élément mineur de l'équation. L'énergie n'est pas souvent considérée puisque la concentration énergétique des sources utilisées permet une grande amélioration du travail.

Le premier principe de la thermodynamique indique que : « *on ne crée pas l'énergie, on la transforme.* »⁴² Pour faire fonctionner une machine ou un procédé chimique il faut introduire de l'énergie dans le système. De plus pour un système ou une machine donné, la forme de base de l'énergie est très importante.

L'essence et le diesel sont très proches au niveau énergétique mais les systèmes qui l'utilisent sont fondamentalement différents. Le charbon est aussi un combustible fossile mais il doit être radicalement transformé pour le mettre à l'état liquide. La théorie néoclassique tente de masquer ces problèmes en prenant pour acquis qu'il sera toujours possible de substituer une forme d'énergie par une autre. C'est bien mal comprendre la réalité de la physique et de la chimie.

La formule de la croissance et de l'énergie s'applique aussi à tous les systèmes vivants. Voici les principes de base de la théorie :

- Toute espèce vivante a besoin d'énergie pour vivre.
- Tout accès à une source d'énergie croissante permet la croissance de l'espèce.
- Les espèces compétitionnent entre elles et entre les individus de ces espèces pour acquérir plus d'énergie et assurer sa survie et sa progéniture
- La nature intervient dans ce modèle en limitant la quantité d'énergie totale disponible en prenant qu'elle provient ultimement de 2 sources :
 - Rayonnement solaire
 - Géothermie

⁴² http://fr.wikipedia.org/wiki/Thermodynamique#Les_lois_de_la_thermodynamique

Cette nouvelle fonction explique donc tous les phénomènes de croissance, incluant la croissance économique. Prenez par exemple la croissance des arbres.

On peut facilement décrire que la croissance est fonction du bois (capital), des feuilles et racines (travail) et du soleil (énergie). La quantité d'énergie (soleil, eau) est présumé stable parce qu'un arbre donné ne se déplace pas. Ce que l'on peut augmenter c'est le nombre de feuille et la quantité de bois. Ces augmentations donnent la même courbe de croissance que la courbe de croissance économique.

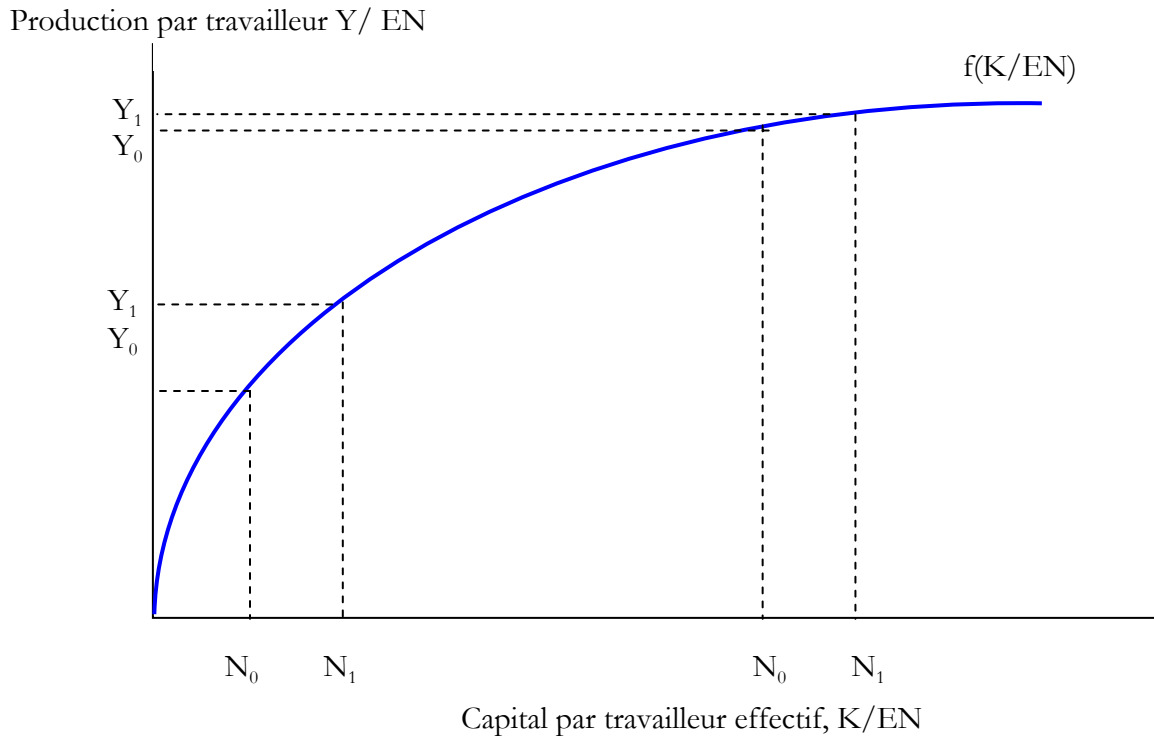


Figure 12 : Courbe de la croissance et énergie

Nous voyons donc que pour une augmentation semblable du nombre de feuille (N), la croissance de l'arbre est beaucoup plus importante au début.

L'énergie disponible (soleil, eau) reste constante, seule son utilisation pour la photosynthèse augmente en fonction du nombre de feuille et l'eau est mieux pompée par les racines en conséquence. Plus l'arbre sera grand, moins l'augmentation du nombre de feuille et de racines va contribuer à la croissance de l'arbre. Pour une espèce d'arbre donné, le seul moyen de croître plus rapidement c'est d'accéder à des périodes d'ensoleillements plus grandes et à plus d'eau. Cela explique l'abondance dans les tropiques et la rareté dans la toundra et le désert.

Ce principe s'applique pour toutes les espèces vivantes y compris l'homme.

ERFEI

On peut ici inclure les principes de base de l'énergie retournée en fonction de l'énergie investie (ERFEI)⁴³

Énergie investie

- Pour **acquérir** de l'énergie, cela **prend** de l'énergie
- Pour **transporter** de l'énergie, cela **prend** de l'énergie
- Pour **emmagasiner** de l'énergie, cela **prend** de l'énergie
- Pour **utiliser** de l'énergie, cela **prend** de l'énergie

Énergie retournée

Après avoir pris compte de toute l'énergie utilisée plus haut, combien d'énergie est-ce qu'il reste? Combien d'énergie en réalité est-ce que ça coûte pour **utiliser** une forme particulière d'énergie.

On comprend donc que chaque type d'énergie utilisée entraîne nécessairement un coût énergétique de base. C'est ce qui limite l'accès à plusieurs sortes d'énergies.

Le bois, source primaire d'énergie exosomatique

Avec une lente évolution, les hommes se sont au départ déplacés pour avoir accès à de nouvelles sources de nourriture et de bois. Au fur et à mesure que les clans se sont agrandis, il devenait plus rentable de s'installer à un endroit et de transporter le bois et la nourriture. Pour cela on a investi du temps et de l'énergie musculaire pour faire les outils suivants :

- Hache
- Chariot
- Bateau
- Etc

Pour chaque outil, l'augmentation de la quantité de bois pour le feu était toujours supérieure à l'énergie investie dans la fabrication de ces objets. Ce principe s'applique pour toutes les sources d'énergies exosomatiques primaires : bois, charbon, gaz, pétrole, etc.

La nutrition, l'essence de la croissance

Le second facteur de croissance est l'augmentation de la population mondiale. Cette augmentation a toujours été permise par une amélioration des techniques d'agriculture et de la technologie.

⁴³ http://www.eroei.com/the_chain/eroei.html Site web collectif

Voici les étapes principales du développement de l'agriculture⁴⁴ depuis son invention il y a 11 000 ans.

- « 11 000 B.C. Découverte de l'agriculture, déplacement des chasseurs-cueilleurs, installation des premiers villages.
- 300 B.C. 1^{er} Harnais à cheval en Chine, permettant d'utiliser le Cheval, plus rapide qu'une bête de somme.
- 1400 AD Innovation de la rotation des cultures, ce qui augmenta la quantité de nourriture produite par hectare.
- 1701 Invention de la machine à semer, basé sur un orgue à flute
- 1798 Calcul de Thomas Robert Malthus (d'où Malthusien) de la possibilité d'un crash de la population par l'impossibilité d'augmenter la production par hectare.
- 1820 Développement des terres au Canada, US, Australie, augmentation de la production totale de blé.
- 1830 Découverte de dépôts de guano en Amérique du sud pour remplacer l'azote et le phosphore dans le sol (nécessaire pour l'agriculture et notre survie)
- 1880 Déplétion des sources de guano et découverte de dépôts de nitrate au Chili
- 1909 Fabrication d'ammoniaque par un procédé inventé par Carl Bosch et Fritz Haber (Procédé Haber-Bosch) ancêtre de l'engrais chimique. L'engrais chimique était trop bon et il faisait pousser le blé à plus de 2 mètre, le rendant vulnérable au vent.
- 1920 Introduction de la mécanisation pour la ferme
- 1949 Développement d'une nouvelle sorte de blé par Orville Vogel le Norin 10
- 1952 Introduction du Norin 10 au Mexique, produisant 3 fois plus par hectare
- 1965 95% de la production de blé au Mexique devient du Norin 10 »

A chacune de ces étapes on a évité des famines normales en augmentant la quantité de blé produite par hectare. Les famines normales sont des moyens de régulation de la population. La population globale a conséquemment augmenté.

Cette amélioration de la productivité des terres et l'utilisation de la mécanisation (moteur à combustion) fait en sorte que moins de personnes sont nécessaires pour cultiver les terres.

Les travailleurs ont donc plus de temps libre et les efforts passent donc du travail agricole vers un travail de production de machines ou de services. Cette libération de temps a été permise par le pétrole à bon marché.

Cette libération de temps a permis à chacune des générations suivantes de travailler moins longtemps pour payer les biens de base (nourriture, logement, chauffage). Le surplus de temps et d'argent entraîne la stabilisation encore plus importante de la société. L'apparition de services gouvernementaux (routes, éducation, infrastructure, médecine) en est le résultat.

Cette grande stabilisation a aussi permis le développement d'activités non essentielles pour un individu mais essentielles au fonctionnement de notre société moderne :

⁴⁴ The Economist, december 24th 2005 – january 6th 2006 – The story of wheat

- L'étude, la recherche;
- Les innovations, la consommation de masse, l'informatique;
- L'industrie de la créativité (musique, arts, spectacles, TV, film, jeux vidéo et de table);
- Le tourisme;
- Les échanges économiques à grande échelle entre pays;

Implications de l'énergie dans le système économique

Le site web www.eroei.com explique avec beaucoup de détails l'économie de l'énergie et des failles de la théorie néoclassique de la croissance. Une école de pensée qui permet de mieux expliquer l'apport énergétique est proposée par le Dr. Robert Costanza du Gund Institute for Ecological Economics⁴⁵ qui définit l'écologie économique comme suit : « *l'économie écologique transcende les frontières disciplinaires traditionnelles afin de prendre en compte les interrelations complexes entre les systèmes écologiques et économiques d'une façon large et complète.* »⁴⁶

Le système économique n'existe pas en vase fermé et la figure de la page suivante illustre bien cette idée. On peut voir que même l'énergie fossile est dérivée de l'énergie solaire. Comme on l'a vu, le pétrole provient de la transformation de plantes et algues qui se sont accumulés pendant des millions d'années. De plus les transformations chimiques ont requis de fortes pressions et de la chaleur disponible seulement par l'effet géothermique de la gravité.

Les flèches qui pointent vers le haut indiquent la perte d'énergie calorifique résiduelle de l'ensemble du système. Tout ce qui est possible, c'est l'amélioration de l'efficacité avec laquelle cette énergie est utilisée. Utiliser de l'énergie efficacement est le fer de lance de presque toute la classe environnementale. Par cela on implique qu'une augmentation de l'efficacité énergétique diminuera la consommation de cette forme d'énergie.

A cela il est opportun d'ajouter que l'efficacité énergétique fut étudiée par William Stanley Jevons⁴⁷ dès 1865. Le moteur à vapeur Newcomen avait été développé en 1711 pour pomper l'eau dans les mines de charbons. James Watt et Matthew Boulton ont ensuite mis sur le marché en 1769 le moteur à vapeur Watt qui utilisait 75% moins de charbon que le moteur Newcomen.

Jevons voulait démontrer que selon son intuition la consommation du charbon aurait diminué depuis l'introduction du moteur Watt. Les données sur la consommation du charbon accumulées durant ces 150 ans ont cependant démontré le contraire, ce qui implique pourquoi on parle du paradoxe de Jevons.

Un système plus efficace diminue le coût du travail effectué donc entraîne une augmentation de la demande pour ce même travail. Produire des systèmes plus efficaces énergétiquement résulte donc en augmentation de consommation de l'énergie.

⁴⁵ <http://www.uvm.edu/gice/?Page=default.html>

⁴⁶ http://www.eroei.com/the_chain/economics.html

⁴⁷ http://en.wikipedia.org/wiki/Jevon%27s_paradox

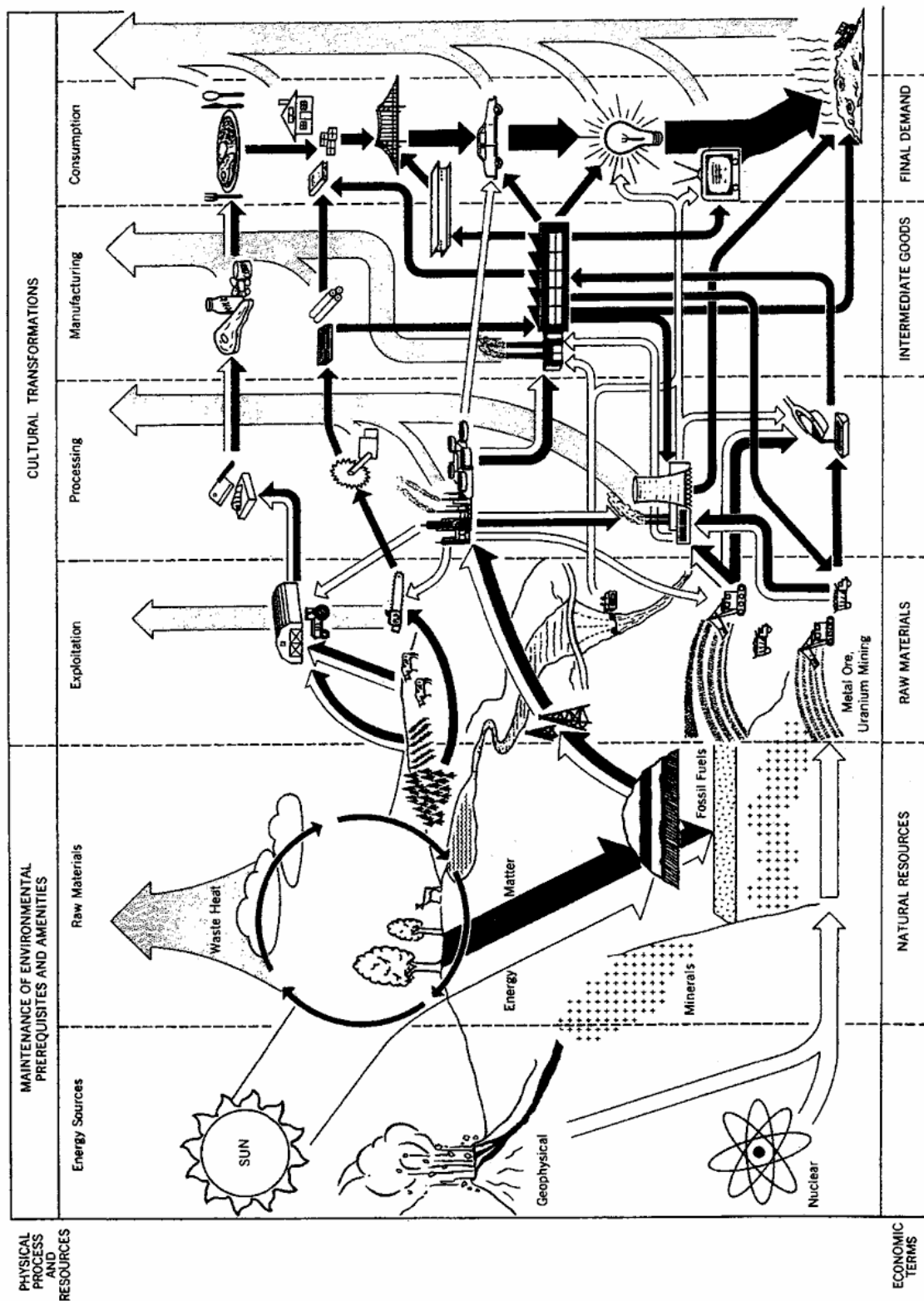


Figure 13 : Système de l'économie écologique étendu

Source : http://www.eroei.com/the_chain/economics.html, tiré de Charles Hall⁴⁸

⁴⁸ Charles Hall et al., The need to reintegrate the natural sciences with economics, p. 664

Angus Maddison, professeur émérite, Faculté d'économie de l'Université de Groningen au Pays-Bas a publié plusieurs livres et plusieurs études sur l'histoire du développement économique. Une de ces études se nomme : *Growth Accounts, Technological Change, and the Role of Energy in Western Growth*⁴⁹. A partir des données de cette étude voici des graphiques qui indiquent visuellement les données colligées.

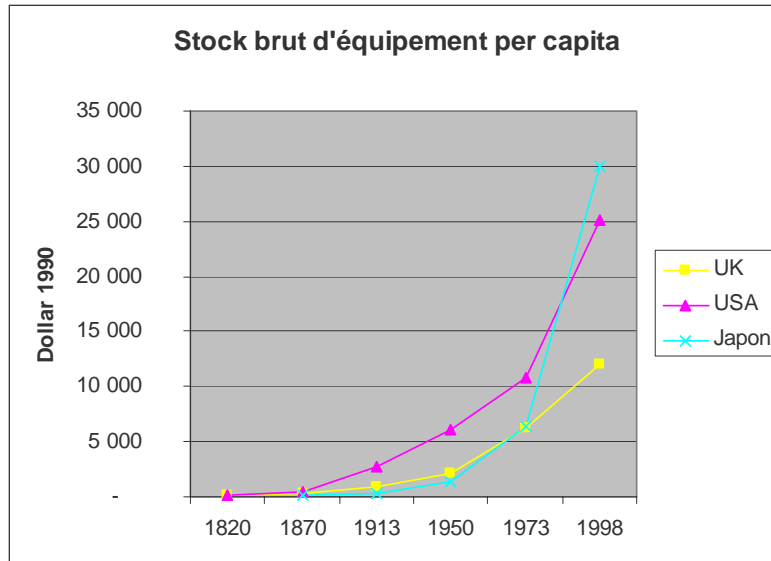


Figure 14 Stock brut d'équipement per capita

Source : Maddison, 2003

Maddison⁵⁰ n'explique pas directement la croissance par l'augmentation de la capacité énergétique. Il décrit l'augmentation du revenu per capita par les quatre façons suivantes « (a) le progrès technique; (b) l'accumulation du capital physique auquel le progrès technique est en général inclus; (c) amélioration des compétences humaines, l'éducation et les habiletés d'organisations; et (d) une plus grande intégration des économies nationales individuelles au travers d'échanges en biens et services, d'investissements et d'interaction entrepreneuriale et intellectuelle. »

Il est évident que ces éléments ont bel et bien contribué à la croissance économique. Lorsque l'on étudie un peu plus loin son explication du progrès technologique, le lien avec les sources d'énergies disponibles devient évident. Le bois et le vent furent les premières sources d'énergie utilisées par notre civilisation. Par la suite la découverte du potentiel du charbon permit l'introduction des machines à vapeur. La découverte et la maîtrise du pétrole introduisirent une source d'énergie encore plus concentrée. Kenneth Deffeyes offre un historique assez complet de la transition dans son livre *Beyond Oil*⁵¹

⁴⁹ *Growth Accounts, Technological Change, and the Role of Energy in Western Growth* in *Economia e Energia, secc. XIII-XVIII*, Istituto Internazionale di Storia Economica "F. Datini" Prato, Le Monnier, Florence, April 2003 http://www.ggdc.net/maddison/ARTICLES/Role_of_energy.pdf

⁵⁰ Maddison, Angus, 1997, *Causal Influences on productivity performance 1820-1992 : a global perspective*, Journal of Productivity Analysis, November 1997.

⁵¹ Deffeyes, Kenneth S, 2005, *Beyond oil : The view from Hubbert's peak*, Hill and Wang, New York

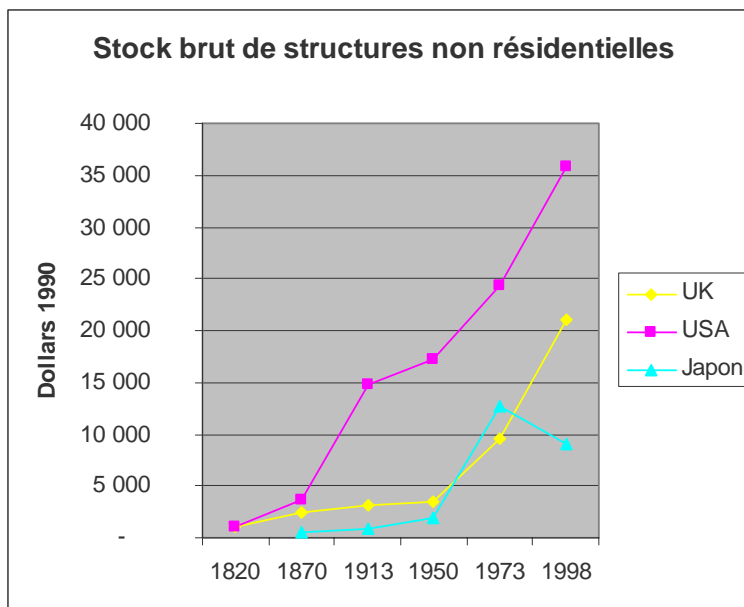


Figure 15 : Stock brut de structures non résidentielles
Source : Maddison, 2003

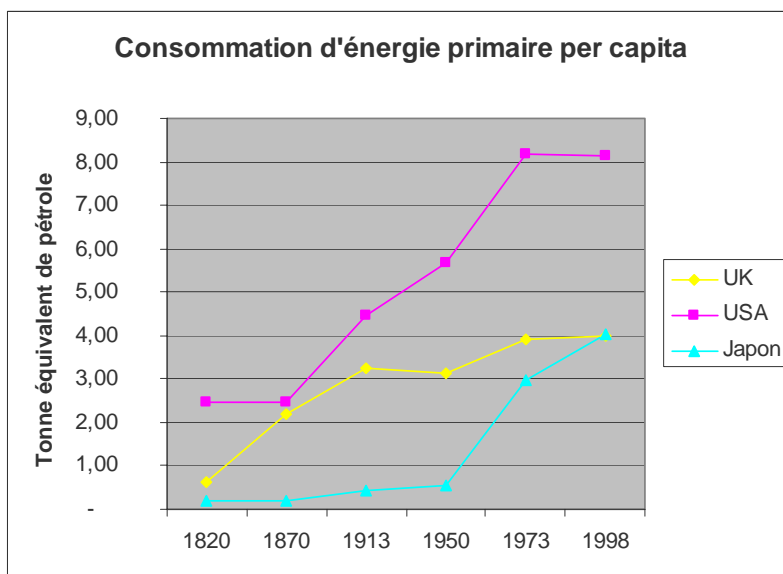


Figure 16 : Consommation d'énergie primaire per capita
Source : Madisson, 2003

Ce graphique démontre bien que la consommation d'énergie per capita a augmenté pour les États-Unis de 1870 à 1973. Incidemment le premier puit de pétrole était creusé en 1869 et le pic de production est survenu en 1971. Depuis 1973 la consommation d'énergie per capita est demeuré a peu près constante. Ce qui peut expliquer la stagnation de la consommation per capita, c'est l'explosion du taux des naissances d'après guerre et que dans les années 70 ces enfants étaient maintenant en age de conduire et de consommer une part plus grande du pétrole disponible.

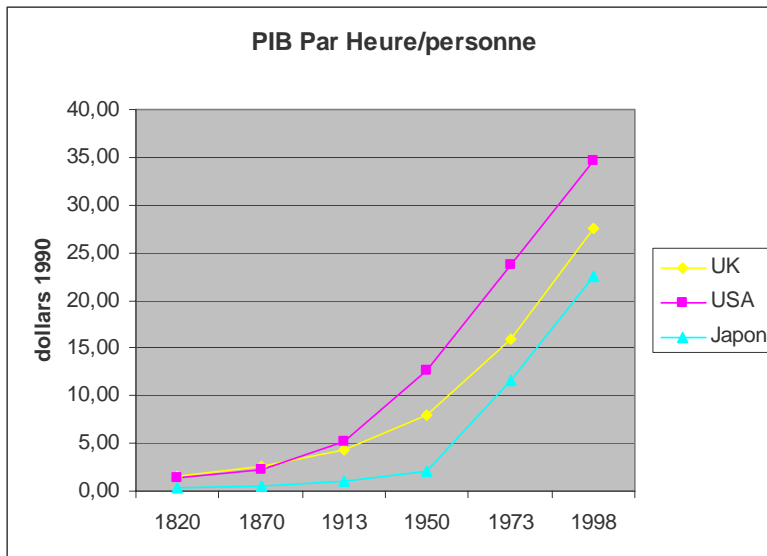


Figure 17 : PIB Par heure/personne
Source : Maddison, 2003

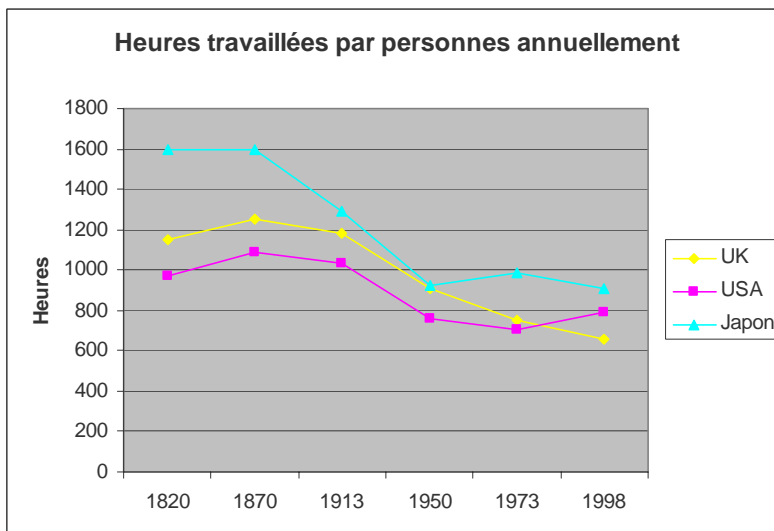


Figure 18 : Heures travaillées par personnes annuellement
Source : Maddison, 2003

Malgré toutes ces données, il peut sembler difficile de savoir si la maîtrise de source d'énergie fortement concentrée est un des facteurs prépondérants de la croissance. En fait il est plus simple de se demander si l'absence de cette forme d'énergie ou la difficulté de trouver une alternative peut engendrer une diminution de cette croissance.

La corrélation entre le pétrole et l'économie

Stuart Staniford⁵² analyse depuis quelques temps les différentes implications du pic pétrolier sur l'économie mondiale. Dans un article⁵³ publié sur le site web The Oil Drum, Staniford a étudié la corrélation entre les miles parcourus par véhicule et le PIB réel américain entre 1970 et 2004. Malgré les similitudes entre ces deux phénomènes il ne peut pas expliquer avec certitude la connexion causale.

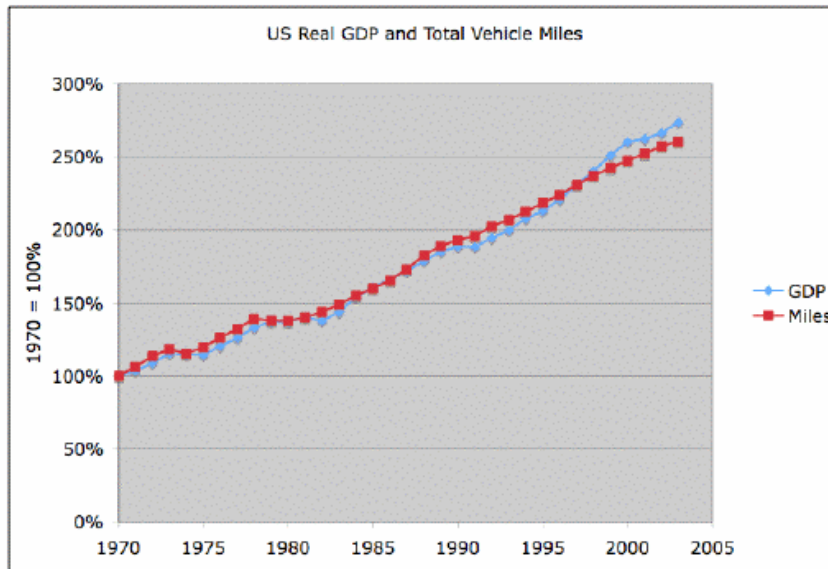


Figure 19 : PIB américain réel et miles parcourus en véhicule au total
Source: The Oil Drum, Stuart Staniford

Il indique lui même qu'il est difficile de trouver une statistique qui croit d'une manière aussi rapprochée avec le PIB. En regardant ce graphique on peut se demander qu'est-ce qui est la cause de ce rapprochement. Est-ce que l'augmentation du PIB entraîne une augmentation du nombre de miles parcourus ou vice-versa?

Staniford présente ensemble les variations annuelles du PIB et des miles en pourcentage et analyse en profondeur ces corrélations. Samuel Foucher dans un article du Graphoilogy⁵⁴ fait la même analyse entre le PIB américain per capita et la consommation de baril de pétrole par capita. Sa conclusion est la suivante : « *Si la consommation de pétrole per capita est réduite, il y a 30% des chances d'avoir une récession tandis que la probabilité n'est seulement que de 2% lorsque qu'il y a croissance de la consommation de pétrole per capita* ».

⁵² Biographie sommaire : <http://www.theoil Drum.com/user/Stuart%20Staniford>

⁵³ Stuart Staniford, 2005, *Driving Recessions* <http://www.theoil Drum.com/story/2005/10/22/235239/89>

⁵⁴ <http://graphoilogy.blogspot.com/2006/03/how-probable-is-us-recession-if-oil.html>

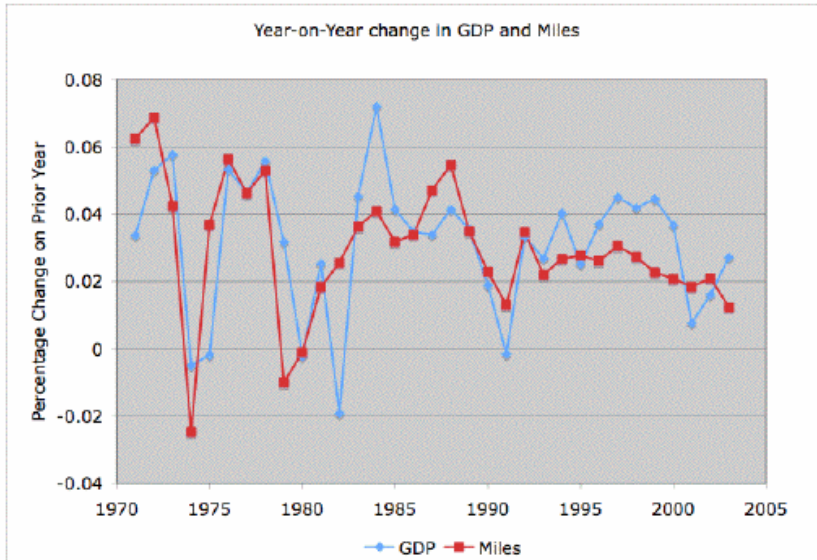


Figure 20 : Variation annuelle du PIB et des miles en pourcentage
 Source: The Oil Drum, Stuart Staniford

Staniford a aussi produit une étude⁵⁵ pour établir la productivité et l'efficacité des véhicules et il a calculé que chaque mile parcouru sur une autoroute contribue au PIB pour une moyenne de 3,37\$ avec une déviation standard de seulement 0,09\$.

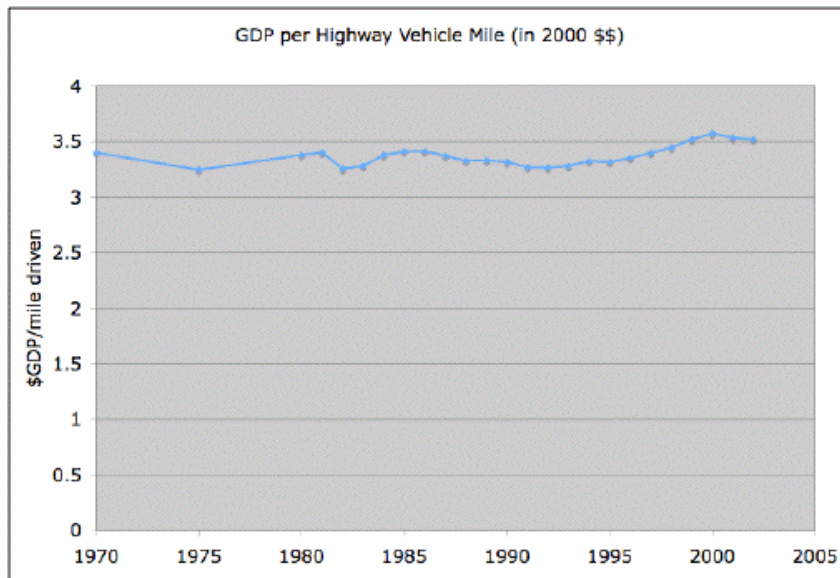


Figure 21 : PIB par mile parcouru sur autoroute (en dollars US de 2000)
 Source : The Oil Drum, Stuart Staniford

⁵⁵Stuart Staniford, 2005, *The productivity of vehicles* <http://www.theoil drum.com/story/2005/10/20/51230/831>

Une autre analyse a été produite afin d'expliquer la chute du bloc soviétique dans les années 80. Marek Kolodziej et Douglas B. Reynolds⁵⁶ ont présenté un article lors du 4^e atelier international sur la déplétion du pétrole et du gaz en mai 2005. Contrairement à la théorie prévalente que la chute a été causée par les politiques de Ronald Reagan et les inefficiences du système socialiste, Kolodziej apporte la preuve que la chute de production du pétrole a causé la chute de l'Union Soviétique.

L'étude de la chute de l'URSS est intéressante puisque son évolution en vase pratiquement clos est un laboratoire pour démontrer l'effet de la chute de la production du pétrole. Il indique que la chute de production s'est produite 1 an avant la chute de l'URSS. Kolodziej indique

« L'analyse démontre que la chute du PIB Soviétique et dans pays de l'ancien bloc soviétique dans les années 80 et 90 n'était pas la cause Granger du déclin de la production de pétrole, mais un déclin dans la production de pétrole était une cause Granger de la chute du PIB. Cependant, la relation charbon versus PIB démontre l'opposé et la relation du gaz naturel versus le PIB ne démontre aucune causalité de Granger. Ceci remet en question les arguments communs de l'inefficacité et suggère que le pétrole a quelque chose à avoir avec la chute. »

Kolodziej explique alors que la structure fermée de l'économie soviétique empêchait ce pays d'exporter de l'argent en vue d'obtenir du pétrole. Pour ce qui est du charbon, on peut expliquer que la production industrielle du charbon demande une grande quantité de pétrole et une économie pétrolière solide. Kolodziej explique l'absence de corrélation entre le gaz naturel et le PIB parce que l'infrastructure était déjà en place et que l'opération ne demande que peu d'entretien et d'énergie.

Dans le système énergétique Québécois il faut alors se demander combien de temps la production hydro-électrique sera possible en l'absence de pétrole ou dans des conditions de rareté de cette ressource. De quelle façon on peut s'assurer que cette forme d'énergie soit maintenue le plus longtemps possible reste encore à résoudre.

⁵⁶ Kolodziej, Reynolds, 2005, *Former Soviet Union Oil Production and GDP Decline: Granger Causality and the Multi-Cycle Hubbert Curve*, Rand Journal of Economics.

http://www.cge.uevora.pt/aspo2005/abscom/Abstract_Lisbon_Kolodziej.pdf pour l'explication et http://www.cge.uevora.pt/aspo2005/abscom/ASPO2005_Kolodziej.ppt pour les calculs.

Conclusion

Les théories néoclassiques de la croissance expliquent la croissance par le progrès technique. Nous avons vu que le progrès technique n'est en fait que des moyens de plus en plus sophistiqué de maîtriser une source d'énergie de plus en plus concentré énergétiquement.

La consommation de pétrole est donc une condition sine qua non pour assurer la croissance économique de la civilisation occidentale. Comme la croissance économique est la base du fonctionnement de tous les systèmes et les organisations conçues depuis les 150 dernières années.

Si on veut poursuivre absolument le mode de vie actuel on se doit donc de trouver, d'implanter et d'utiliser des énergies alternatives. De plus on devra probablement se passer de l'économie du pétrole pour implanter ces alternatives.

Section 3 : Analyse et critique des alternatives et solutions proposées

Alternatives au niveau de l'approvisionnement en énergie

Une des approches apportées par les environmentalistes pour régler le problème de la consommation de pétrole est de consommer une autre forme d'énergie. C'est une méthode de régler le problème qui peut sembler intéressante au départ. Il existe présentement certaines alternatives qui sont viables à petite échelle et que l'on développe en ce moment à plus grande échelle. Voici les principales :

- Énergie solaire
- Énergie éolienne
- Voiture hybride
- Éthanol et voitures Flexfuel, Biodiesel et autre biomasse
- Sables bitumineux, pétrole lourd
- Schiste bitumineux
- Hydro électricité
- Charbon et essence de charbon
- Gaz naturel
- Hydrogène

Robert Hirsch⁵⁷ a produit une étude pour le département américain de l'énergie. Le département a tenté au départ de camoufler la sortie du rapport et même si les spécialistes connaissent le rapport, les médias en général ne se sont pas appropriés vraiment l'information. Hirsch étudie les options possibles pour palier aux problèmes du pic pétrolier⁵⁸ :

- Conservation
- Amélioration de l'extraction du pétrole
- Pétrole lourd et Sables bitumineux
- Gaz vers liquides (Gas-To-Liquids)
- Liquides de source américaine domestiques
- Transfert du carburant vers l'électricité
- Autres transferts de carburants
- Hydrogène
- Autres facteurs pouvant causer des délais

Cette étude met de l'avant des scénarios de réponse aux problèmes du pic pétrolier selon le nombre d'années précédent l'évènement du pic pétrolier. Hirsch convient que toutes les

⁵⁷ Robert L. Hirsch travaille pour l'organisme de recherche SAIC (Science Applications International Corporation) qui est la plus grande entreprise de recherche et d'ingénierie détenue par des employés aux États-Unis. Une courte biographie est disponible à l'adresse suivante : http://www.d-n-i.net/fcs/hirsch_bio.htm

⁵⁸ Hirsch, Robert L. Février 2005, *Peaking of world oil production: Impacts, mitigation, & risk management*, SAIC 2005. <http://www.hilltoplancers.org/stories/hirsch0502.pdf>

solutions demandent au moins 20 ans pour être appliqués. Il faut donc assumer que si on est près ou déjà passé le pic pétrolier, il y aura 20 ans de difficultés économiques avant de produire une solution adéquate. Comme l'économie ne sera que très difficilement capable de se maintenir face à une diminution constante de l'énergie per capita, on peut croire que les solutions ne seront probablement implantées que localement si on est trop près du pic pétrolier.

Toutes ces alternatives ne sont pas vraiment faciles à implanter à l'échelle de l'économie mondiale et demandent des quantités de matières premières considérables. La production de turbines éoliennes, hydraulique ou de panneaux solaires demande une économie stable et des matières premières qui doivent être extraites, transformées, transportées, manufacturées et enfin installées. Les différentes pièces de ces équipements doivent être entretenues ou remplacées. On voit donc que si le pétrole n'est pas là pour fournir une certaine énergie de base, le reste sera beaucoup plus difficile à produire.

L'économie mondiale est fondée sur l'accès au pétrole disponible à faible coût, autant monétaire qu'énergétique. Si l'énergie qui est mise à la disposition de la demande mondiale est trop dispendieuse ou inefficace énergétiquement, il ne sera pas possible de poursuivre le mode de vie actuel.

Hirsch présente bien l'ampleur du problème et que le transport est un secteur névralgique de la consommation de l'énergie. Présentement le pétrole constitue 99% de l'apport énergétique utilisé pour les transports.

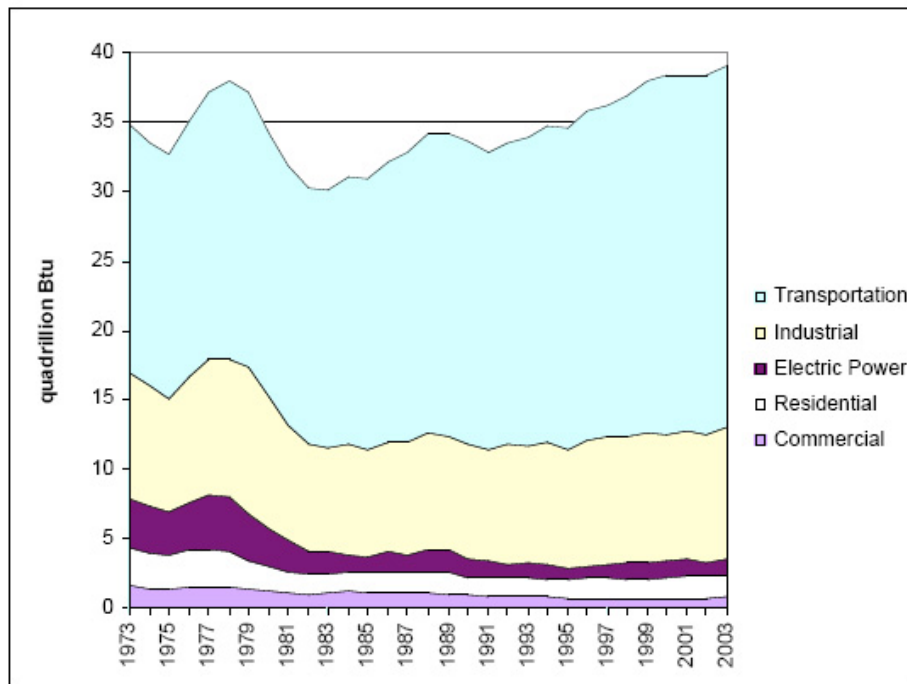


Figure 22 : Consommation américaine par secteur 1973-2003

Source : Hirsch, 2005

Pour bien évaluer les alternatives il faut considérer l'ensemble de l'organisation de la société et se demander ce qu'il faut changer pour que l'on puisse trouver des solutions viables à long

terme. Il faut aussi prendre en considération qu'en plus de remplacer l'énergie utilisée présentement, il faut aussi répondre à l'augmentation de la demande future. Répondre à la demande actuelle représente déjà un défi de taille impressionnante, répondre à l'augmentation de la demande est du domaine de l'impossible.

Énergie solaire directe

L'énergie solaire peut être récoltée de plusieurs façons différentes, par panneaux photovoltaïques (PV), par énergie solaire thermique et par énergie solaire passive. Ted Trainer de la Faculté des Arts de l'Université de New South Wales en Australie a fait une étude⁵⁹ pour analyser les différentes énergies renouvelables.

Il indique en premier lieu que les entreprises et les chercheurs qui développent les différentes énergies renouvelables sont en général trop optimistes au niveau de la productivité et du retour sur l'énergie investie des différentes technologies. Il indique que les panneaux solaires ont été développés en premier lieu pour répondre à un besoin de mobilité et d'éloignement des sources normales d'énergie. Il a toutefois estimé l'infrastructure nécessaire pour construire une centrale de 1000 Mégawatts (MW). Pour fin de comparaisons il utilise un projet concurrent de centrale au mazout de 1000 MW. La centrale Manic 5 au Québec a une puissance installée de 1 528 MW

Trainer présente l'ensemble des calculs et des estimations dans son rapport. Pour un souci de clarté et de facilité de la comparaison, vous retrouverez les données au tableau 4. La puissance nécessaire est calculée pour la saison hivernale.

Tableau 4 : Comparaison des coûts d'une centrale Photovoltaïque et au mazout

	Centrale PV	Centrale au mazout
Puissance livrée le jour	1 000 MW	1 000 MW
Puissance livrée la nuit	670 MW	670 MW
Puissance devant être installée (avant les pertes du transport, de la conversion, etc.) pour le jour	77 896 MW	1 200 MW
Puissance devant être installée (avant les pertes du transport, de la conversion, l'accumulation) pour la nuit	373 519 MW	0 MW (déjà installé)
Puissance totale	451 416 MW	1 200 MW
Modules PV	5.18kWh par m ²	---
Surface de collection	87 million m ²	
Coût par Watt (converti de \$ Australien)	5\$	
Balance du système	5\$	
Watt par panneau (1/2 m ²)	75 W	
Coût par m ²	1 500\$	
Coût de la centrale	130,6 Milliard \$	2,45 Milliard \$
Coût du charbon sur 20 ans		2 milliard \$

⁵⁹ Ted Trainer, 2004, Renewable energy; what are the limits?, <http://socialwork.arts.unsw.edu.au/tsw/D87.RE.Ch.2PV.html>

Ces coûts ne comprennent pas les provisions de production pour compenser pour les jours nuageux. De plus l'accumulation de l'énergie représente un défi de taille et est possible par l'accumulation d'hydrogène dans un puits de mine de 1300 km de long. On voit donc rapidement les difficultés physiques et financières pour l'opération d'une centrale solaire.

Sans entrer dans les détails, il analyse aussi les systèmes de production individuels domiciliaire. Il indique que « *pour répondre à la demande australienne de 700 PetaJoule on a besoin de 30 centrales de 1000 MW ou 3330 million de m². C'est approximativement 12 fois la surface disponible sur les toits résidentiels [en Australie]... »*⁶⁰

De plus la production d'électricité ne permet pas facilement la conversion pour l'utilisation dans les transports. L'énergie solaire photovoltaïque n'est donc pas une solution adéquate comme énergie renouvelable.

Énergie éolienne

Tout comme l'énergie solaire, l'énergie éolienne ne peut pas être utilisée pour répondre aux besoins du secteur du transport. Même en utilisant les principes de l'économie de l'hydrogène ou des piles au lithium, l'efficacité est très limitée. Il est probable que tout comme l'énergie solaire, l'énergie produite par une éolienne dans sa vie utile ne puisse pas couvrir l'énergie utilisée pour produire cette éolienne.

La production d'éoliennes à grande échelle requiert les fondements d'une économie stable et la transformation d'une grande quantité de métaux (aluminium, cuivre, alliages magnétiques, acier, etc.) Le prix de ces métaux, comme nous l'avons vu dans la première section de ce rapport, son en augmentation considérable.

De plus un facteur important de la viabilité actuelle des centrales éoliennes sont les subsides gouvernementales pour assurer presque tous les stades de développement, d'implantation, d'opération et enfin au niveau de l'achat de l'électricité produite. Au niveau mondial, les centrales éoliennes doivent être accompagnées d'une centrale au diesel ou au mazout pour fournir une base de sécurité. L'énergie produite par éolienne ne dépasse pas en général 20% de la puissance des centrales au mazout ou l'équivalent en centrales hydroélectriques.

Trainer a produit une analyse exhaustive⁶¹ de la possibilité d'utilisation de l'énergie éolienne et il conclut en disant qu'il est improbable que l'énergie éolienne occupe plus qu'une faible fraction de la production électrique nécessaire pour répondre à la demande actuelle.

⁶⁰ Ted Trainer, 2004, Renewable energy; what are the limits?,
<http://socialwork.arts.unsw.edu.au/tsw/D87.RE.Ch.2PV.html>

⁶¹ <http://socialwork.arts.unsw.edu.au/tsw/D89.RE.Ch.4.Wind.html>

Voiture hybride

La voiture hybride est individuellement un moyen efficace de réduire sa consommation de pétrole. Hirsch indique que vers 2015 le taux de pénétration des voitures hybrides ou diesel sera d'environ 10%. Ceci est dû en particulier à cause des limites de production des industries. La durée de vie d'un véhicule est en moyenne de 17 ans. Pour remplacer ou modifier la flotte de véhicules existants il faut escompter au moins 25 ans. Hirsch nous dit que 20 ans de préparation sont nécessaires afin de se prémunir des effets. Jan Lundberg⁶² nous dit que la possibilité d'un choc pétrolier paralysant est très forte et durera seulement quelques jours ou semaines.

Le paradoxe de Jevons nous dit aussi que l'efficacité accrue des voitures hybrides permet une plus grande consommation de la ressource. Quoique l'augmentation de cette consommation par l'amélioration de l'efficacité de sa consommation les implications économiques sont difficiles à détecter à première vue. Si seulement une partie des consommateurs, disons 10%, consomment moins de pétrole mais que le reste de la population ne change pas leur consommation, la réduction de la consommation par les premiers 10% des consommateurs sera annulée par les consommateurs réguliers. De plus l'argent économisé pour l'utilisation de ce mode de transport moins onéreux sera probablement dirigé vers un autre secteur de l'économie ou épargné dans une banque. Dans les deux cas cette économie contribue à favoriser la croissance économique qui engendre une augmentation de la consommation globale.

La voiture hybride ne règle pas le problème non plus pour l'aviation, le transport maritime et la machinerie agricole. La voiture hybride n'est donc pas une solution mais une façon d'économiser tant que l'économie du pétrole est encore sur ses pieds.

Éthanol et voitures Flexfuel, Biodiesel et autre biomasse

La possibilité d'utiliser la biomasse pour produire du carburant liquide semble intéressante à première vue. En effet on utilise de la biomasse pour produire de l'éthanol ou du biodiesel et cela contribue à diminuer la quantité d'émission de gaz à effet de serre. En laboratoire et pour de petites applications, cette approche semble intéressante.

En réalité il y a deux inconvénients majeurs qui empêchent son implantation à grande échelle. Premièrement produire de l'éthanol requiert plus d'énergie qu'il n'en produit. Deuxièmement la production annuelle de toute la matière organique sur la terre ne peut suffire qu'à une infime partie de la demande annuelle en carburant.

⁶² Jan Lundberg est l'éditeur du Lundberg Petroleum Review, une bible de la production du pétrole.
http://www.culturechange.org/cms/index.php?option=com_content&task=view&id=21&Itemid=2

Pour ce qui est du rapport énergétique, David Pimentel a produit deux études pour évaluer le rendement énergétique de l'éthanol. La première en 1991⁶³ a été revue et analysé par un panel de scientifique diversifié et selon Lawrence Salomon⁶⁴ « *Le GAO [General Accounting Office] a dépensé 20 fois plus d'argent pour réviser le travail du Dr. Pimentel que l'équipe du Dr. Pimentel à utilisé pour produire la recherche. Après avoir disséquer sa méthodologie et scruté chaque preuve, le GAO, aussi, endosse les résultats du Dr. Pimentel* » Une autre publication en 1998⁶⁵ a encore une fois démontré que produire un gallon d'éthanol requiert 71% plus d'énergie que l'énergie contenue dans ce gallon d'éthanol.

Dans son étude sur les énergies renouvelables, Trainer a évalué les différentes méthodes de production de carburant a partir de biomasse. L'ensemble de l'étude indique l'impossibilité physique de produire suffisamment de biomasse pour répondre a au moins une faible fraction de la demande en carburant. Pimentel indique que pour produire du carburant à partir de biomasse pour la consommation annuelle d'une voiture, la surface de terrain est 7 fois celle utilisée pour nourrir une personne.

Sables bitumineux et pétrole lourd

Au Canada le débat sur la disponibilité de pétrole est rapidement amené au niveau de la production de pétrole à partir des sables bitumineux. Il existe même une campagne médiatique de la part de Shell pour indiquer que les sables bitumineux représente une quantité incroyable de réserve de pétrole. Ceci est vrai et on le remarque autan au niveau de l'économie Albertaine qu'au niveau de la force du dollar Canadien.

Ce qui est moins connu ce sont les limites de la production de cette ressource. Pour produire du pétrole à partir de sables bitumineux il faut de grandes quantités d'eau, du gaz naturel et une infrastructure de production considérable. Les investissements en capitaux sont aussi très importants. L'utilisation intensive de gaz naturel pour extraire les sables bitumineux va probablement être difficile puisque la réduction de la disponibilité nationale du gaz naturel va faire augmenter les prix et ainsi les coûts de production.

Hirsch indique que la production canadienne actuelle est d'environ 1 million de baril par jour(Mbpj). Il est possible que d'ici 2030 la production augment à 5 Mbpj. On peut comparer cette production avec la production actuelle de l'Arabie Saoudite de 12 Mbpj. La production actuelle ne répond qu'à un peu plus de 1% de la demande mondiale. Il ne faut donc pas compter sur les sables bitumineux pour remplacer la production de pétrole léger.

⁶³ Pimentel, David. 1991. Ethanol fuels: Energy security, economics, and the environment. *J. Agr. Environ. Ethics* 4: 1-13.

⁶⁴ Lawrence Salomon, 2002, *...or cornball critics*, 9 octobre 2002, National Post
<http://www.greatchange.org/bb-alcohol1.GAO.html>

⁶⁵ Pimentel, David, 1998, *Energy and dollar costs of ethanol production with corn*, Hubbert Center Newsletter, Colorado School of mines.
http://hubbert.mines.edu/news/Pimentel_98-2.pdf

De plus un article du New-York Times du 19 avril 2006⁶⁶, on indique qu'il y a une grande difficulté d'approvisionnement en pneu de grande dimension, ce qui va probablement placer une limite physique dans la possibilité d'extraction des sables bitumineux et des autres ressources naturelles.

Le pétrole lourd est surtout produit au Venezuela et il ne peut être raffiné que dans des installations spéciales situées au Texas. Le président Hugo Chavez est à couteau tiré avec l'administration américaine et si ce n'était que de la difficulté technique de vendre son pétrole à d'autres pays qu'aux États-Unis, il l'aurait déjà fait.

Hydrogène

L'hydrogène n'est pas une source d'énergie. Ce n'est qu'un médiocre moyen de transporter de l'énergie. C'est impossible physiquement de faire fonctionner une économie énergétique. Trainer indique dans ses travaux que « *la conversion d'énergie électrique en hydrogène n'est pas efficace en ce moment, et il ce ne le sera jamais.* »⁶⁷

Trainer présente aussi ses conclusions :

«

- Les éoliennes produisent de l'électricité.
- L'électricité est convertie en hydrogène gazeux à 70% d'efficacité.
- L'hydrogène est compressé pour le pompage, avec une perte d'énergie de 20%.
- L'hydrogène est pompé sur de longues distances avec une perte de 30% (ou une perte de 65% pour le transport du Sahara vers l'Europe).
- Perte au stations de plein, assumons 5% (?).
- Perte dans la pile combustible, 50% possiblement 40%.

En combinant ces pertes on obtient que seulement 15% à 18% [...] de l'énergie généré par l'éolienne termine comme électricité utilisable, ou puissance moteur de véhicule. »

Une compagnie du Nouveau Mexique⁶⁸ a produit un système de conversion vers l'utilisation de l'hydrogène dans les véhicules existant. Ils utilisent des hydrides interstitiels⁶⁹ afin de faciliter le stockage par rapport au stockage gazeux ou liquide. La validité scientifique de cette offre demeure à analyser en profondeur. On peut toutefois observer qu'un coût de conversion de 7 000\$ à 10 000\$ est considérable. De plus le problème est au niveau de la mise à l'échelle d'une production industrielle de masse. Il faudra quand même produire l'électricité nécessaire pour suffire à la demande, ce qui est problématique comme nous l'avons vu plus haut.

⁶⁶ Extraits de l'article : <http://www.eurotrib.com/story/2006/4/20/171052/931>

article original : http://www.nytimes.com/2006/04/20/business/20tire.html?_r=1&th&emc=th&oref=slogin

⁶⁷ Ted Trainer, 2004, Renewable energy; what are the limits?

<http://socialwork.arts.unsw.edu.au/tsw/D91.RE.Ch.6.Hydrogen.html>

⁶⁸ United Nuclear <http://www.switch2hydrogen.com/>

⁶⁹ Voir <http://en.wikipedia.org/wiki/Hydrides>

Autres alternatives

Les autres alternatives ont tous les mêmes problèmes au niveau de l'utilisation à grande échelle et du temps d'ajustement et de remplacement pour répondre au problème qui est approximativement de 20 ans. La géologie nous indique que le temps restant est probablement moins de 2 ans avec une forte probabilité que ce soit déjà trop tard pour trouver des solutions au niveau de l'apport énergétique.

L'hydroélectricité est un bon moyen pour le Québec et quelques autres exceptions mondiales. Il faut toutefois se demander si une rupture de l'économie et des livraisons de pétrole pourrait mettre en danger l'entretien des centrales existantes. Il y a lieu de se demander si le choc systémique pétrolier n'emportera pas aussi l'intégrité de la structure de production, de transport et de distribution de l'hydro électricité.

L'hydroélectricité pourrait être un moyen de faciliter la transition économique et sociale. Par contre les applications futures seront probablement de petites centrales au fil de l'eau ou avec un petit barrage. Les métaux utilisés pour produire les turbines et les générateurs seront alors probablement récupérés à partir de la déconstruction des infrastructures existantes.

Conclusion

Comme nous l'avons vu, il n'est pas possible de remplacer facilement le pétrole par d'autres sources d'énergie afin de poursuivre le mode de vie actuel. Quelque soit les alternatives et les technologies avancées, il n'est pas possible de « produire » de l'énergie, seulement de l'extraire ou de le transformer.

Le système économique ne peut pas demeurer intact sans l'apport d'une source d'énergie polyvalente, portable, fiable et économique. L'essence est encore très économique en ce moment. Au début mai 2006 l'essence se vend 1,14\$ le litre. Cela représente seulement 0,29\$ par tasse. Avec une tasse d'essence, on peut déplacer un véhicule, 5 personnes et des bagages sur 2 km. Tentez d'offrir 0,29\$ à un fermier pour vous transporter 2km vous et vos 5 amis, vous comprendrez que 1,14\$ le litre est réellement une aubaine.

Toute solution visant à poursuivre le mode de vie actuel par l'introduction d'une nouvelle source d'énergie sera bénéfique si c'est utilisé en vue d'une transition vers un mode de vie beaucoup plus local et moins intense énergétiquement.

Conclusion du rapport

Les recherches effectués dans le cadre de ce travail démontre que :

1. L'extraction du pétrole va atteindre ou à déjà atteint le taux maximum de production possible, ensuite il entre dans une phase de déclin toujours plus prononcé.
2. L'économie mondiale est directement liée à la consommation du pétrole et une baisse de la production est susceptible d'entraîner une chute de l'économie mondiale
3. Les alternatives proposées au niveau de l'apport énergétique ne pourront fournir qu'une partie infime de la demande énergétique mondiale. Le rendement énergétique de plusieurs alternatives est au mieux une fraction de l'énergie investie au pire c'est un rendement négatif.

Le problème du Pic Pétrolier est réel et important. Il ne sera probablement jamais résolu et il y a une forte probabilité pour que l'instabilité économique s'installe dès que les premiers signes soient vraiment pris en compte par le public en général. Il existe aussi quelques autres facteurs aggravants qui pourront s'appliquer tel que :

1. L'inflation artificielle du dollar américain qui peut entraîner une dévaluation massive du dollar. Le dollar américain et les différents actifs sont déjà dévalués par rapport au cours de l'or.
2. L'attrait du dollar américain comme monnaie de réserve diminue de semaines en semaines et les banques centrales portent des gestes indiquant que l'Euro ou le Yuan pourront être des monnaies de remplacement.
3. La bulle immobilière spéculative américaine est présentement en perte de vitesse et son éclatement brutal est éminent.
4. La géopolitique mondiale est en effervescence en ce moment. Les tensions entre l'Iran et les États-Unis sont vives et peuvent engendrer une guerre. Le Venezuela est en guerre verbale avec les américains. La Bolivie vient de nationaliser la production de gaz et de pétrole. Le MEND (Mouvement pour l'émancipation du Delta du Niger) au Nigéria sabote la production de pétrole de ce pays.
5. L'agriculture occidentale obtient les rendements actuel grâce au pétrole et au gaz naturel⁷⁰. Une chute de la disponibilité du pétrole et une rupture de l'économie va engendrer des pénuries de produits alimentaires.

⁷⁰ Pfeiffer A, Dale, 2004 : *eating fossil fuels*, From The Wilderness
http://www.fromthewilderness.com/free/ww3/100303_eating_oil.html

6. Selon Jan Lundberg⁷¹ une augmentation brusque du prix du pétrole accompagné par une diminution de la disponibilité du pétrole peut engendrer une panique qui figera le fonctionnement de la société.
7. L'absence de réflexe de culture de jardin et de conservation pour la saison hivernale dans la société occidentale amène la forte possibilité de famine et de perte de vies.
8. Une crise majeure peut avoir lieu à l'automne 2006 ou à l'hiver 2007 et ne pas permettre la mise en production de jardins.

Les quelques solutions que l'on peut apporter pour ce problème sont relativement radicales et demandent une coordination de plusieurs acteurs de l'ensemble de l'économie et des communautés. Le travail de préparation doit commencer dès maintenant pour profiter au maximum de la stabilité présente de l'économie.

Tenter de remplacer les automobiles existantes par des automobiles plus économiques aura un résultat nul sur l'économie d'essence. Les alternatives ne sont pas assez denses énergétiquement. On peut se demander de quelle façon les avions vont voler sans pétrole.

Ce qu'il faut se poser comme question c'est comment sommes-nous prêts à modifier profondément et radicalement notre mode de vie afin d'assurer notre survie individuelle et collective dans les 2 ou 3 prochaines années.

Le secteur de Roberval et la région du Saguenay Lac Saint-Jean ont probablement assez de terres arables pour soutenir une production agricole paysanne (avec peu de mécanisation). Il y a aussi suffisamment de terrains pour faire des jardins afin de se prémunir contre un choc.

Pour ma part, j'ai déjà entrepris de faire un grand jardin afin de prévenir les effets possibles et ainsi poursuivre les modifications nécessaires par la suite. C'est l'étape la plus difficile psychologiquement mais la plus sûre en ce moment.

⁷¹ Lundberg, Jan : 2005 : *Preparations and policies for petrocollapse and climate distortion*, Culture Change.
http://www.culturechange.org/cms/index.php?option=com_content&task=view&id=17&Itemid=2

Bibliographie

Pour ceux qui veulent en savoir plus.

Information en français

Site web :

Wikipédia, Pic Pétrolier : http://fr.wikipedia.org/wiki/Pic_p%C3%A9trolier

Très bien documenté, une bonne introduction.

Oléocène <http://www.oleocene.org/> Visitez la section Wiki qui est très complète

<http://www.oleocene.org/wiki/index.php?title=Accueil>

Transfert : <http://www.transfert.net/d51>

Bon dossier, par contre le site web n'est plus mis à jour depuis 2003

Wolf at the Door : <http://www.wolfatthedoor.org.uk/francais/index.html>

Site web bilingue sur le sujet, va en profondeur sur les conséquences possibles

Livres :

La vie après le pétrole, février 2005, Jean-Luc Wingert et préface de Jean Lahérière

La fin du pétrole : Le vrai défi du XXI^e siècle, octobre, 2005, James Howard Kunstler, traduction

Les grandes batailles de l'énergie : Petit traité d'une économie violente, octobre 2004, Jean-Marie Chevalier, Joseph Stanislaw et préface de Claude Mandil

Pétrole Apocalypse, septembre 2005 Yves Cochet

Le plein, s'il vous plaît, la solution au problème de l'énergie, février 2006, Jean-Marc Jancovinci, Alain Grandjean

Les enjeux de l'énergie : Pétrole, nucléaire, et après ?, mars 2005 de Larousse

Le défi énergétique : De l'épuisement des ressources au développement durable, février 2006, Jean-Claude Laroche

Pour trouver de l'information sur ces livres, cherchez sur www.amazon.fr certains de ces livres ne sont pas disponibles au Canada en ce moment.

Information en anglais

La majeure partie de l'information et des nouvelles sur le Pic Pétrolier est en anglais. Vous pouvez chercher sur différents sites de recherche avec les termes peak oil, oil, energy crisis.

Voici les sites web les plus importants, crédibles et mis à jour régulièrement.

Energy Bulletin : <http://www.energybulletin.net/> Bulletin d'information sur l'énergie, le pic pétrolier, rassemble plusieurs articles par jour et les classent selon le sujet traité.

The Oil Drum : <http://www.theoil Drum.com/> Forum de discussion avec des articles d'experts, de chercheurs et de spécialiste de beaucoup d'aspects de production du pétrole, du pic pétrolier et de la géopolitique.

ODAC : <http://www.odac-info.org/> Oil Depletion Analysis Center. La section "assessments" comporte plusieurs publications et recherches sur le Pic Pétrolier. Très crédible.

ASPO : <http://www.peakoil.net/> Association for the Study of Peak Oil&Gas. Comprend des liens vers les autres ASPO de pays particulier. ASPO Ireland présente un bulletin chaque mois. Très crédible

Post Carbon Institute : <http://www.postcarbon.org/> Très bon pour observer les pistes de solution possible. Récemment le Post Carbon Institute a fait passer une résolution à la ville de San Francisco concernant le pic pétrolier.

Transition Culture : <http://transitionculture.org/?p=129> Présente un plan de décente énergétique pour la ville de Kinsale en Irlande. Très complet et comporte de bonnes pistes de solution.

Life after the oil crash (LATOC) : <http://www.lifeaftertheoilcrash.net/BreakingNews.html> Concentration de nouvelles portant sur le pic pétrolier, la géopolitique, l'économie et autres possibles catastrophes. La page d'accueil comporte un résumé passablement pessimiste sur le problème du pic pétrolier.

Hubbert Peak : <http://www.hubbertpeak.com/> Contient de nombreuses publications scientifiques concernant la croissance, l'énergie, le pétrole, le pic pétrolier, etc. Publications de M. King Hubbert, Jean Laherère, Collin J. Campbell, Albert Bartlett, David Pimentel, Kenneth Deffeyes, etc.

Graphoilogy : <http://graphoilogy.blogspot.com/> Très complet pour les méthodes de calculs pour déterminer la production et la capacité d'exportation des pays producteurs du pétrole. Un des spécialistes est physicien dans un laboratoire du Québec.

Simmons & Company : <http://www.simmonsco-intl.com/> Banque d'investissement pétrolier, une des plus importante. Matthew Simmons est le fondateur de ce livre et publie des présentations qu'il effectue devant des auditoires influents au États-Unis.
EROEI : <http://www.eroei.com/index.html> Très bon pour comprendre que les différentes alternatives au pétrole ne sont pas toutes viables énergétiquement. EROEI veut dire Energy Return on Energy Invested ou Énergie Retourné Pour l'Énergie Investie (ERPEI).

Eating Fossil Fuels :

http://www.fromthewilderness.com/free/ww3/100303_eating_oil.html

Bonne explication de l'implication du pétrole dans l'agriculture moderne.

MuseLetter : <http://www.museletter.com/index.html> L'Auteur du livre « The Party's Over, Oil, War and the fate of industrial societies. Il est celui qui propose en ce moment un protocole de déplétion du pétrole. Plusieurs articles de fond intéressants sur le sujet.

Financial Sense Online : <http://www.financialsense.com/> Informations, éditoriaux et articles de fond sur les différents mouvements économiques et financiers actuel. Très bon pour les courtiers en valeurs mobilières.

Livres :

Il existe plusieurs livres en anglais, la plupart sont facilement trouvable en visitant les sites web cité plus haut. Une courte recherche avec Peak Oil sur www.amazon.com offre 116 résultats.

Beyond Oil : The view from Hubbert's Peak, Kenneth Deffeyes est très bien écrit et comporte plusieurs passages comiques, c'est un géologue spécialisé sur le sujet.

Twilight in the Desert: The Coming Saudi Oil Shock and the World Economy, Matthew Simmons, très technique inquiétant parce qu'il indique que l'Arabie Saoudite est probablement sur le point d'une chute importante de la production.

Film :

Oil Crash : the Movie : <http://www.oilcrashmovie.com/> Lavaproduction AG, Zurich Switzerland

The End of Suburbia : <http://www.endofsuburbia.com/> Disponible uniquement en anglais.