

De l'âge du pétrole à l'âge du méthane

Considérations sur l'évolution technologique
et sur le rôle potentiel du gaz naturel au XXIe siècle

Arnulf Grübler

International Institute for Applied Systems Analysis
Château de Laxenburg, A-2361 Laxenburg

Passage d'une énergie à une autre: un processus de substitution technologique

La consommation mondiale d'énergie primaire s'est accrue de 2,2% par an pendant les 130 dernières années. La croissance différentielle des différentes sources énergétiques (fig. 1) a produit une série de changements progressifs dans la structure du système énergétique: les énergies "traditionnelles" faisaient peu à peu place aux nouvelles sources d'énergie. On peut l'illustrer par l'évolution des parts de marché de plusieurs énergies primaires (fig. 2): le bois, à l'origine dominant (environ 70% du marché en 1860), est relayé par le charbon, dont la position atteint son apogée vers 1910 pour ensuite se réduire au profit de sources d'énergie plus récentes (pétrole et gaz naturel).

On relèvera ici que la substitution des sources d'énergie n'a pas été provoquée par un épuisement des ressources ou par un prix plus avantageux des énergies nouvellement introduites sur le marché. Le pétrole a supplanté le charbon quoique les réserves de charbon aient été quasi inépuisables et quoique les prix des produits pétroliers ne soient devenus compétitifs que plus tard (lorsque le développement progressif des techniques et infrastructures pétrolières a permis de réduire les coûts). Le pétrole conquiert le marché parce que sa densité énergétique était supérieure (de même que celle du charbon était supérieure à celle du bois) et parce qu'il impliquait une technologie supérieure à celle du charbon à tous les échelons: production (forages au lieu de galeries de mines), stockage et transport (pipelines), utilisation des produits finals (carburants pour moteurs à combustion interne au lieu de machines à vapeur alimentées au charbon). Le passage d'une énergie à une autre doit donc être compris comme un processus de substitution technologique; les techniques qui s'avèrent supérieures pour la production et l'utilisation l'emportent sur les précédentes.

On peut comparer les diverses technologies à des "espèces" concurrentes au sein de la même "niche écologique". Nous l'exprimons à l'IIASA* en appliquant l'équation générale de Lotka-Volterra, laquelle décrit l'équilibre dynamique à

* International Institute for Applied Systems Analysis. Cet institut, financé par seize académies des sciences et organisations analogues, est un institut interdisciplinaire Est-Ouest et s'est donné pour tâche d'appliquer des méthodes d'analyse de systèmes aux problèmes d'importance mondiale. Les projets de recherche se rapportent à la recherche mathématique fondamentale, à l'environnement, à la démographie, aux effets économiques et sociaux du changement technologique.

l'intérieur de biocénoses. Dans un cas simple, qui ne considère que deux technologies, nous constatons que la seconde technologie, plus avantageuse, supplante l'ancienne selon une courbe caractéristique en S; nous mesurons ce processus de substitution en relevant les parts de marché de la nouvelle technologie et décrivons la substitution par une fonction logistique (application particulière de l'équation générale de Lotka-Volterra). Dans la figure 3, nous illustrons ce processus de substitution à propos de l'introduction de dix-sept innovations, étudiée par Fisher et Pry.

Avant de nous tourner vers des analyses plus complexes, à savoir la description de systèmes où plusieurs technologies sont en compétition sur le marché, examinons encore une importante transformation linéaire de la fonction logistique de substitution dans la figure 3. Si le quotient de la part de marché déjà atteinte (F) par celle qui reste à atteindre ($1-F$) est représenté à l'échelle logarithmique (c'est-à-dire $\log[F/1-F]$), la courbe logistique apparaît comme une ligne droite qui se prête mieux à l'analyse optique de la phase d'introduction et de saturation du cycle de vie technologique; c'est pourquoi, dans les exemples présentés ici, on utilisera de préférence la transformation $\log(F/1-F)$ de la fonction logistique de substitution.

Substitution d'énergie primaire dans le monde

Après cette introduction méthodologique, tournons-nous à nouveau vers l'évolution historique de la situation énergétique du monde (fig. 4). Nous utilisons ici un modèle de multiple substitution développé à l'IIASA par Marchetti et Nakicenovic. On voit que l'évolution structurelle du système énergétique mondial est caractérisée par la succession des phases d'introduction, de saturation et de déclin des diverses énergies primaires. L'évolution de la part de marché de chaque énergie primaire (dans la transformation $F/[1-F]$, c'est-à-dire part de marché d'une énergie divisée par le total des parts restant aux autres énergies, et représentée à l'échelle logarithmique) apparaît comme une succession régulière de substitutions de nouvelles formes d'énergie aux traditionnelles; l'évolution historique peut être ainsi fort bien retracée et extrapolée pour l'avenir.

D'autres hypothèses de travail encore sont nécessaires pour établir des prévisions. La première se rapporte au taux de croissance de l'énergie nucléaire; les données disponibles ne permettent en effet pas de déterminer le taux de croissance à partir du passé. Pour le bois, le charbon, le pétrole et le gaz naturel, il a fallu à chaque fois un siècle environ pour que la part de marché croisse de 1% à 50% (ou diminue d'une même grandeur). Nous avons admis par analogie un taux de croissance du même ordre pour l'énergie nucléaire. Mais, comme l'illustre la figure 4, l'énergie nucléaire a accusé un taux de croissance très supérieur lors de son introduction. Cette croissance "excessive" (par rapport aux constantes observées pour les autres énergies) pourrait expliquer les difficultés et la stagnation actuelles du développement de l'énergie nucléaire dans le monde; l'énergie nucléaire traverse une phase de transition avant de trouver un rythme de croissance plus lent; il en résulte que nous ne prévoyons pas de croissance significative de l'énergie nucléaire jusqu'à l'an 2000.

La seconde hypothèse concerne l'introduction de nouvelles sources d'énergie, qui dans le passé avait lieu à peu près tous les cinquante ans*. Poursuivant cette perspective, nous introduisons après l'an 2000 une nouvelle source que nous appelons Solfus pour suggérer qu'il pourrait s'agir d'énergie solaire ou de fusion nucléaire.

Apogée du méthane au XXIe siècle

La caractéristique la plus saillante (et peut-être la plus inattendue) de cette projection est que le gaz naturel y apparaît comme l'énergie dominante du XXIe siècle. D'après la figure 4, le gaz naturel couvrirait après l'an 2000 plus de la moitié de la consommation totale d'énergie.

Même si ce résultat surprend après quinze ans de débats sur l'énergie, une série de raisons plaide en faveur de ce rôle futur du gaz naturel. Ces raisons, qui font du gaz naturel (ou méthane) une énergie supérieure aux autres à bien des égards et que nous exposerons plus en détail tout à l'heure, tiennent avant tout à l'importance des réserves disponibles, à leur répartition relativement vaste et décentralisée, à la propreté, au coût modéré (par rapport par exemple au gaz de synthèse produit à partir du charbon), à la souplesse élevée et aux possibilités très appréciables de développement et d'amélioration autonomes des technologies de production, de transport et d'utilisation finale du gaz naturel.

Parent pauvre naguère, énergie à part entière demain

Les grandes possibilités recelées par le gaz naturel ont été longtemps sous-estimées parce que les particularités qui le distinguent du pétrole (emplacements et caractéristiques des gisements [le méthane est compressible, le pétrole ne l'est pas], avantages écologiques éminents, variété de possibilités d'utilisation) étaient trop peu reconnues. Historiquement, le gaz naturel a été d'abord un sous-produit de la production pétrolière, souvent indésirable et brûlé à la torche, un "parent pauvre" en quelque sorte.

Ce n'est que depuis peu que l'industrie gazière devient autonome par rapport à l'industrie pétrolière. Précédemment, la prospection du gaz n'avait pas lieu pour elle-même et les gisements de gaz étaient découverts soit conjointement avec ceux de pétrole (gaz associé), soit plus ou moins fortuitement alors qu'on cherchait du pétrole. Un autre effet des liens étroits avec l'industrie pétrolière fut que le gaz fut considéré, à tort pensons-nous, comme une source d'énergie rare et précieuse qu'il fallait réserver, et encore, à certains usages, par exemple dans le secteur résidentiel. Cette manière de voir est encore très répandue et a entravé le développement de la technologie gazière et des emplois nouveaux du gaz naturel.

* Nous reviendrons plus loin sur le fondement de cette hypothèse, qui se déduit de l'analyse des cycles conjoncturels de longue durée (cycles Kondratiev). Ces fluctuations économiques sont provoquées par l'apparition par vagues d'innovations majeures, génératrices de nouveaux produits et de nouvelles industries, lesquels ont une influence décisive sur la phase de croissance d'un cycle Kondratiev; la saturation simultanée conduit ensuite aux crises ou dépressions.

La figure 5 illustre le phénomène à propos des Etats-Unis. Les cycles conjoncturels sont décrits par les changements des tendances de trois indicateurs (indice des prix de gros, consommation d'énergie et intensité énergétique, c'est-à-dire quantité d'énergie consommée par unité monétaire du produit national brut). Le graphique illustre en outre l'évolution des prix réels de l'énergie. Les énergies primaires qui se substituent l'une à l'autre sont le bois et le foin (fournissant l'énergie nécessaire à la traction animale), le charbon, le pétrole et le gaz naturel (la production de gaz à partir des champs pétrolifères a été incluse dans la technologie pétrolière, seule la production autonome de gaz naturel a été comptée comme technologie gazière), et l'énergie nucléaire.

On voit que l'évolution économique, la substitution d'une énergie primaire à l'autre et les prix obéissent à une périodicité régulière.

La dépression de 1870 est caractérisée par le plafond de la part du foin au marché énergétique. La rupture structurelle conduit à une envolée des prix de l'énergie et à l'introduction d'une nouvelle énergie (pétrole). La phase de croissance qui suit est caractérisée par la prépondérance du charbon et la croissance des industries qui lui sont liées (machine à vapeur, chemin de fer, acier Bessemer, etc.) tandis que les prix (y compris ceux de l'énergie) baissent.

La part du charbon au marché atteint son stade de saturation lors de la dépression des années trente. Le niveau des prix s'élève fortement, le pétrole renchérit, et le gaz naturel "autonome" (c'est-à-dire qui n'est pas le sous-produit de la production pétrolière) fait son apparition. La phase de croissance qui s'ensuit est caractérisée par la dominance croissante du pétrole et la croissance des industries et produits qui lui sont liés (moteur à combustion interne, industrie automobile, pétrochimie, matières plastiques, etc.).

Nous nous trouvons à nouveau dans une phase de rupture structurelle. La part du pétrole au marché a atteint son stade de saturation, nous avons déjà connu les envolées des prix de l'énergie en 1973 et en 1979/80 (à l'IIASA, Marchetti se fondait déjà en 1980 sur ces considérations pour prédire une chute des prix du pétrole brut, et les trois derniers cycles nous font supposer que son prix restera bas en termes réels) et attendons la prochaine poussée de croissance qui sera accompagnée par l'importance de plus en plus grande du méthane.

Ces réflexions sont là pour nous rappeler que bien des phénomènes qui surprennent à première vue se révèlent à l'analyse comme faisant partie de la dynamique et de la périodicité de l'évolution économique. Dans cette perspective, le gaz naturel représente une étape logique de l'évolution historique et constitue, de par ses avantages considérables, le moteur idéal de la phase de croissance qui marquera le passage du XXe au XXIe siècle.

Avantages réels et idées fausses à propos du gaz naturel

Disponibilité et répartition régionale des ressources

On croit généralement que les ressources de gaz naturel sont très limitées; pour corriger ce préjugé, il s'agit tout d'abord d'expliquer les différences fondamentales qui existent entre un gisement de gaz et un gisement de pétrole et de préciser les caractéristiques du gaz. Ces différences ont été plutôt méconnues du fait que la production de gaz a résulté à l'origine de la prospection et de la production du pétrole.

Il existe du méthane dans quasiment tous les sédiments du monde et son existence n'est pas limitée aux conditions géologiques particulières (et relativement rares) qui sont nécessaires pour la découverte du pétrole (anticlinaux ou "pièges" stratigraphiques, gamme de profondeur dite "fenêtre pétrolière").

Deuxièmement, alors qu'on ne trouve plus de pétrole au-delà d'une certaine profondeur du fait des pressions et des températures croissantes, le méthane est stable jusqu'à 30 km de profondeur (température de l'ordre de 1000°C, pression de 10 000 bar). On sait de plus que la répartition des fréquences des gisements en fonction de la profondeur n'est pas la même pour le pétrole et pour le gaz. Autrement dit, on a de fortes chances de trouver beaucoup de gaz à des profondeurs où l'on ne peut plus guère espérer découvrir du pétrole. Vu que, dans le passé, la prospection était concentrée sur le pétrole, les sédiments plus profonds n'étaient que rarement examinés.

Troisièmement, le gaz est compressible alors que le pétrole ne l'est pas. Cette propriété est importante, car elle permet d'extraire du gaz de strates qui seraient imperméables au pétrole. Un baril de pétrole extrait d'une profondeur de 10 000 mètres reste un baril de pétrole à la surface, tandis qu'un baril de gaz (comprimé) à cette profondeur occupe à la pression atmosphérique un volume de jusqu'à 500 barils.

Tous ces facteurs expliquent que les réserves de gaz soient beaucoup plus également réparties dans le monde que les réserves de pétrole. Une centaine de pays disposent de gisements de gaz naturel commercialement exploitables. On a découvert des réserves de gaz récupérables dans bien des pays où l'on avait abandonné la prospection pétrolière faute de succès (p.ex. en Nouvelle-Zélande, en Malaisie; un gisement de gaz était découvert même dans la vallée de Katmandou, dans l'Himalaya).

La figure 6 illustre à quel point les réserves de gaz ont augmenté plus vite que celles de pétrole; en 1970, les réserves de gaz étaient égales à 48% des réserves de pétrole; en 1985, la proportion avait passé à 91%. Pendant ces quinze ans, les réserves mondiales de gaz ont crû quatre fois plus vite que la consommation. Cette tendance s'observe également aux Etats-Unis, le pays le mieux prospecté du monde. La part du gaz dans les forages productifs y est en augmentation constante (fig. 7). Comme nous voudrions savoir quelles quantités supplémentaires de gaz on aurait découvertes si la prospection n'avait pas été presque entièrement limitée à la recherche de pétrole!

Jusqu'à présent, nous n'avons fait état que d'une petite partie des ressources possibles de méthane, à savoir les réserves de gaz naturel "conventionnel". Le méthane se présente en outre, et en grandes quantités, ailleurs que dans les gisements habituels: dans les veines de charbon, dans les strates de sable et de schistes fortement comprimées, dans les eaux souterraines à grande profondeur où règne une pression élevée. Mentionnons enfin que la discussion relative à l'origine des hydrocarbures s'est ranimée récemment et suggère qu'il pourrait exister du méthane d'origine non biologique, ce qui inciterait à admettre des réserves quasi illimitées; l'hypothèse est séduisante même si elle n'est pas incontestée.

Il n'existe d'estimations sur les ressources de gaz non conventionnelles que pour les Etats-Unis, mais elles n'en sont pas moins impressionnantes. Hannemann les a estimées, en 1986, à plus de 230 billions de mètres cubes, soit quarante fois les réserves conventionnelles et 500 fois la consommation annuelle de gaz naturel des Etats-Unis.

La technologie permettant d'extraire ces quantités fabuleuses n'existe pas pour l'instant, mais rien n'exclut qu'elle apparaisse à l'avenir; nous passerons tout à l'heure en revue les améliorations possibles des techniques gazières. Et qui aurait cru, il y a vingt ans, qu'on peut parfaitement produire du gaz dans les conditions qui règnent dans la partie septentrionale de la Mer du Nord (gisement de Troll p.ex.), ou qu'il était possible de pratiquer avec succès des forages en Méditerranée sous 1500 mètres d'eau?

Pour terminer, abordons rapidement la discussion sur l'origine non biologique des hydrocarbures. Cette théorie, déjà défendue au XIXe siècle par Mendeleïev et von Humboldt, est aujourd'hui reprise avec beaucoup de détails et de conviction par l'astrophysicien Gold. La théorie du professeur Gold met en rapport ce que nous savons aujourd'hui de la formation de la Terre avec la répartition très large des hydrocarbures observée dans le système solaire (n'oublions pas que plusieurs planètes ont une atmosphère de méthane).

D'après cette théorie, les combustibles fossiles seraient issus de la diffusion du méthane à partir de l'intérieur de la Terre. Ce méthane représente alors un réservoir quasi inépuisable, accumulé à très grande profondeur sous des couches géologiques imperméables d'où on pourrait l'extraire. D'après la théorie, ce gaz aurait au cours de sa migration vers la surface de la Terre enrichi en carbone et en hydrogène des dépôts de matières organiques et contribué ainsi à la formation du pétrole et du charbon. Si fascinante que soit la théorie, si convaincants que soient les arguments en sa faveur, elle reste à vérifier. Elle s'est toutefois avérée suffisamment séduisante pour qu'on pratique un forage dans le cratère de Siljan, en Suède (où il n'existe selon la théorie classique pas de chance de découvrir des hydrocarbures) et qu'on ait trouvé les fonds nécessaires pour le financer.

Indépendamment de cette discussion, nous constaterons que les réserves de gaz conventionnelles et les ressources non conventionnelles connues sont très importantes et largement répandues. Du fait que la prospection s'est longtemps concentrée sur le pétrole, en négligeant généralement les caractéristiques propres de la géologie des gisements de gaz, les ressources de gaz ne peuvent pas être estimées pour le moment dans leurs quantités ultimes, mais la situation est certainement caractérisée davantage par l'abondance que par la pénurie.

Coût et souplesse

Lorsqu'on hésite à décider d'investissements, le gaz naturel permet de réduire les frais et de conserver une grande souplesse. Il existe des turbines à gaz modulaires extrêmement performantes (rendement de 48% pour la production d'électricité, davantage si la chaleur est également utilisée) qui nécessitent beaucoup moins de capitaux que les centrales à charbon ou nucléaires. D'après une étude du MIT, les dépenses d'investissement ne sont que d'un tiers de celles qu'implique une centrale à charbon; dans la majorité des cas, des turbines à gaz alimentées en méthane constituent la manière la plus avantageuse d'augmenter les capacités de production électrique des Etats-Unis.

L'installation se fait en six mois, les machines sont fabriquées en série, la centrale peut être érigée à proximité des consommateurs (ce qui permet d'utiliser également la chaleur résiduelle) sans susciter de résistances émotionnelles, les problèmes de sécurité sont limités; tous ces arguments, ajoutés à d'autres, font du gaz naturel une source d'énergie décentralisée et favorable à l'environnement. Le gaz naturel est donc aussi une énergie à considérer pour la production

d'électricité, surtout en des temps où l'évolution de la demande est incertaine et où les prescriptions futures relatives à la lutte contre la pollution et à la sécurité risquent de rendre le risque financier prohibitif pour les centrales à charbon ou nucléaires.

Percées technologiques et progrès techniques possibles

La liste des techniques gazières dans lesquelles une amélioration peut aboutir à une réduction des coûts et des percées technologiques pouvant mener à de nouvelles applications est fort longue; elle inclut la prospection, les forages, l'extraction, le transport, la distribution et l'utilisation auprès du consommateur final (industrie, ménages, production d'électricité). Les améliorations techniques et les augmentations de rendement possibles n'ont pas été jusqu'ici considérées dans les prévisions énergétiques; celles-ci partent en général de l'état présent de la technique et le supposent constant pendant vingt ou trente ans, de sorte que leurs estimations sont très prudentes. Mais le passé nous enseigne que le progrès technique a toujours été un moteur essentiel du développement en matière d'énergie.

Les possibilités techniques actuelles d'extraire le gaz de très grandes profondeurs ou dans des conditions extrêmement difficiles, l'augmentation du rendement d'utilisation, les nouveaux domaines d'application du gaz naturel (comme la réduction directe des minerais de fer) montrent qu'on doit tenir compte des progrès ultérieurs possibles. Des études de l'IIASA à ce sujet ont montré que le potentiel de croissance du gaz est très supérieur à ce qu'on croit communément, même en ne projetant que très prudemment les tendances passées du changement technologique et des améliorations de rendement dans le futur. La part du gaz naturel dans la consommation énergétique de l'Europe de l'Ouest, qui était d'environ 14% en 1980, pourrait doubler en cinquante ans et s'accroître encore plus en cas d'innovations technologiques importantes (p.ex. un nouveau procédé à haut rendement permettant de fabriquer des carburants liquides à partir du gaz naturel).

A titre d'exemples des nombreuses techniques gazières qui, à notre avis, sont susceptibles d'être très améliorées, nous voulons examiner de plus près les forages à très grande profondeur et les turbines à gaz à très haut rendement.

Les figures 8 et 9 illustrent le progrès des techniques de forage en rapport avec les profondeurs atteintes. L'évolution technologique a permis de descendre toujours plus bas. Quoique ces techniques aient été conçues pour l'industrie pétrolière et que leur développement (pour l'adapter aux conditions particulières des gisements de gaz) n'en soit qu'à ses débuts, il est évident que l'évolution des techniques de forages permettra d'atteindre bien davantage de gisements de gaz. D'autres progrès, dans la microélectronique, permettront de saisir et d'analyser sur place les données géologiques, ce qui réduira les frais et augmentera les chances de pratiquer des forages productifs.

Le développement de technologies de haut rendement et peu polluantes pour transformer le gaz en électricité (et en chaleur), par exemple la pile à combustible ou la turbine à gaz, est loin d'être terminé. Les turbines à gaz atteignent actuellement un rendement de 48% (davantage en cas d'association chaleur-force). Il n'est pas impossible que ce rendement soit porté à près de 60%; on peut prendre pour modèles les progrès réalisés dans la technique des turboréacteurs. Nous voyons donc que la technologie gazière a encore de grands progrès devant elle et que le gaz naturel présentera à l'avenir encore plus d'avantages économiques aussi bien qu'écologiques.

Protection de l'environnement

Un dernier avantage éminent du gaz, sa propreté, ne nous retiendra pas longtemps; il est en effet le plus évident et le plus généralement reconnu. La combustion du gaz ne dégage pas de SO_2 , relativement peu de NO_x , et ce dernier peut être fortement réduit par des mesures simples et peu coûteuses telles qu'une modification de la conception des brûleurs. Ces avantages sont particulièrement précieux du fait que le SO_2 et le NO_x sont supposés être les principaux responsables des pluies acides. De plus, le gaz naturel a l'avantage d'être celui des combustibles fossiles qui produit le moins de CO_2 . Le passage à l'âge du méthane pourrait donc atténuer le problème de changements climatiques globaux.

Le méthane est finalement l'énergie idéale pour assurer la transition vers un système énergétique qui ne produirait pas d'émissions nocives. Jusqu'à présent, l'évolution historique a tendu à continuellement améliorer le rapport entre hydrogène et carbone (fig. 10). L'âge du méthane pourrait ainsi déboucher sur un âge de l'hydrogène dans lequel il n'existerait plus de pollution.

BIBLIOGRAPHIE

- J.C. Fisher et R.H. Pry, 1971. *A Simple Substitution Model of Technological Change*. Technological Forecasting and Social Change 3:75-88.
- N.S. Goell, S.C. Maitra et E.W. Montroll, 1971. *On the Volterra and Other Nonlinear Models of Interacting Populations*. Rev. Mod. Phys. 43:231-276.
- M. Grenon et C. Delahaye (ed.), 1983. *Conventional and Unconventional World Natural Gas Resources*. Proceedings of the Fifth IIASA Conference on Energy Resources. CP-83-S4. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria.
- T. Gold et S. Soter, 1980. *The Deep Earth Gas Hypothesis*. Center for Radio-physics and Space Research, Cornell University, Ithaca, N.Y.
- A. Grübler et N. Nakicenovic, 1987. *The Dynamic Evolution of Methane Technologies*. WP-87-2. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria.
- N.D. Kondratiev, 1926. *Die langen Wellen in der Konjunktur*. Archiv für Sozialwissenschaft und Sozialpolitik 56/3: 573-609.
- C. Marchetti et N. Nakicenovic, 1979. *The Dynamics of Energy Systems and the Logistic Substitution Model*. RR-79-13. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria.
- C. Marchetti, 1981. *Society as a Learning System: Discovery, Invention, and Innovation Cycles Revisited*. RR-81-29. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria.
- C. Marchetti, 1982. *When Will Hydrogen Come?* WP-82-123. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria.
- C. Marchetti, 1982. *Invention et innovation: les cycles revisités*. Futuribles, mars 1982.
- C. Marchetti, 1983. *Pas de reprise pour demain*. Forum de développement # 93, août-septembre 1983.
- C. Marchetti, 1986. *L'automobile en danger de mort lente*. Futuribles #99, mai 1986.
- N. Nakicenovic, 1986. *Patterns of Change - Technological Substitution and Long Waves in the United States*. WP-86-13. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria.
- H.H. Rogner, S. Messner, M. Strubegger et E. Schmidt, 1986. *The Methane Age, Likely Gains in Current Technologies, Emerging Technologies and Their Likely Consequences Economic - Political - Geopolitical*. WP-86-68. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria.
- H.H. Rogner, 1987. *Technology and the Prospects for Natural Gas, Results of Current Gas Studies*. Energy Policy (sous presse).
- M. Strubegger et S. Messner, 1986. *The Influence of Technological Change on the Cost of Gas Supply*. WP-86-38. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria.
- J.A. Schumpeter, 1939. *Business Cycles*, vol. 1 et 2. McGraw-Hill, New York.

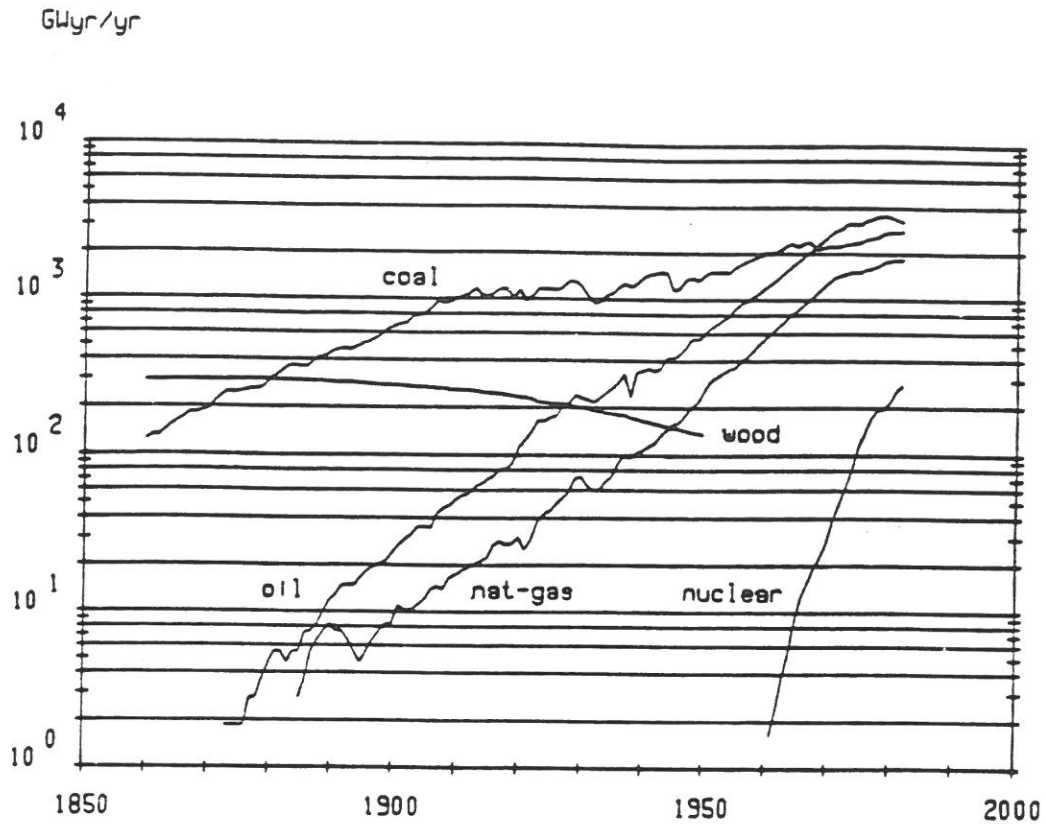


Figure 1. Evolution de la consommation mondiale d'énergie primaire (Grübler et Nakicenovic, 1987)

Consommation globale de différentes sources d'énergie primaire (bois, charbon, pétrole, gaz naturel et énergie nucléaire) en gigawatts-années (un gigawatt-année équivaut à environ un million de tonnes d'équivalent charbon). L'échelle logarithmique permet de relever les taux de croissance différents des énergies et leurs variations. Ces différences dans les taux de croissance modifient les parts de marché des énergies.

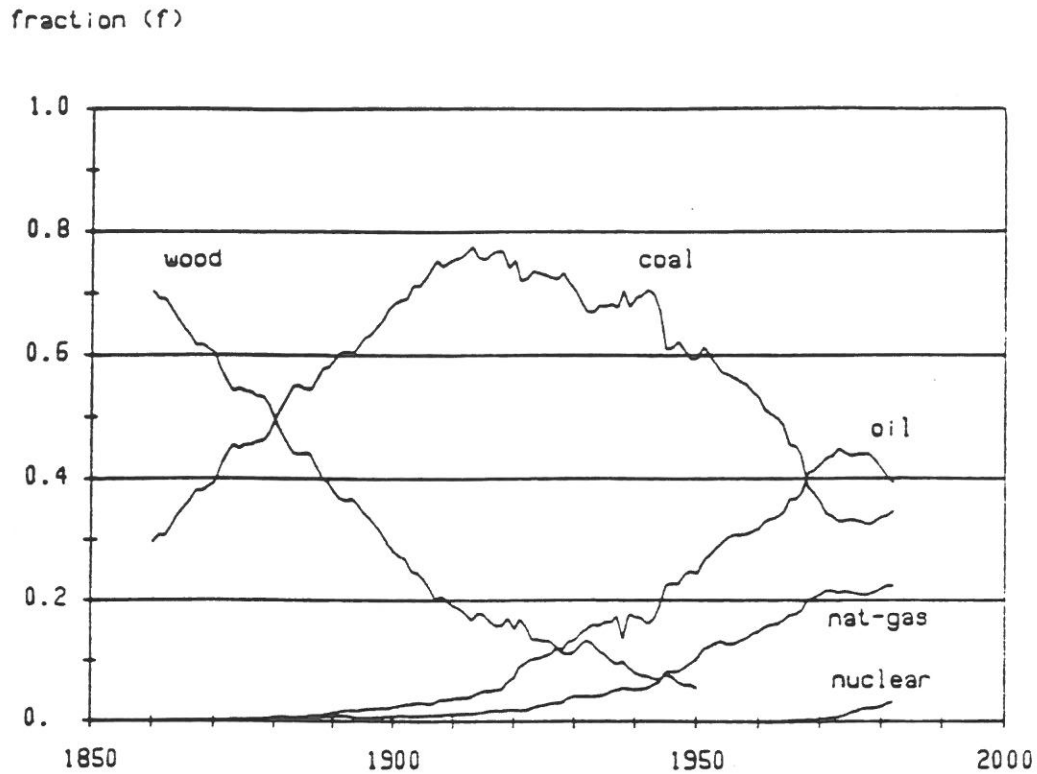


Figure 2. Evolution de la part de différentes énergies dans la consommation mondiale d'énergie (Grübler et Nakicenovic, 1987)

Part (f multiplié par 100 est égal au pourcentage) dans la consommation d'énergie de plusieurs sources énergétiques (bois, charbon, pétrole, gaz naturel et énergie nucléaire). Les taux de croissance différents produisent des changements dans les parts de marché, que nous pouvons décrire par une série de fonctions logistiques dans un modèle de substitution technologique.

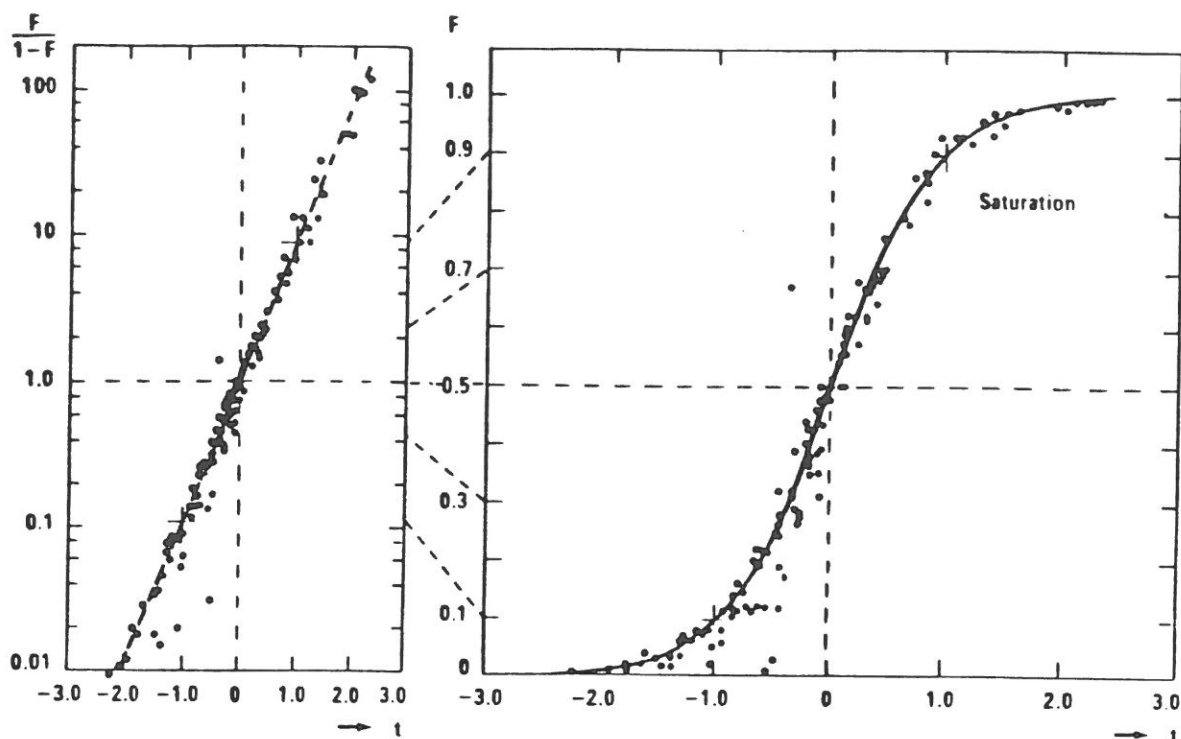


Figure 3. Cycle de vie des innovations technologiques à partir de leur introduction (d'après Fisher et Pry, 1971)

De nouvelles technologies (et de nouvelles sources d'énergie primaire) pénètrent sur le marché selon une courbe caractéristique en S. Le graphique montre l'introduction de dix-sept innovations différentes (acier électrique, fibres synthétiques, détergents, etc.), mesurée par leur part de marché F . Dans le cas simple, nous ne considérons que deux technologies, l'ancienne qui recule (et n'apparaît pas sur le graphique) et la nouvelle, plus avantageuse, qui la supplante peu à peu. Les technologies se comportent comme des espèces biologiques qui pénètrent dans une nouvelle niche écologique et, si elles y sont mieux adaptées, supplantent les espèces précédentes.

L'évolution de la part de marché de la nouvelle technologie est décrite par une courbe logistique. Cette courbe peut être transformée en ligne droite. Si l'on représente le rapport entre la part de marché déjà atteinte (F) et celle qui reste à atteindre ($1-F$) à l'échelle logarithmique (c'est-à-dire $\log[F/1-F]$), la fonction logistique apparaît comme une ligne droite qui se prête mieux à l'analyse optique des phases d'introduction et de saturation. C'est pourquoi nous utilisons généralement cette transformation linéaire de la fonction logistique de substitution. Si la dernière technologie introduite n'est pas supplantée par une autre (ce qui est rarement le cas), elle tend à dominer complètement le marché (part tendant vers 100%).

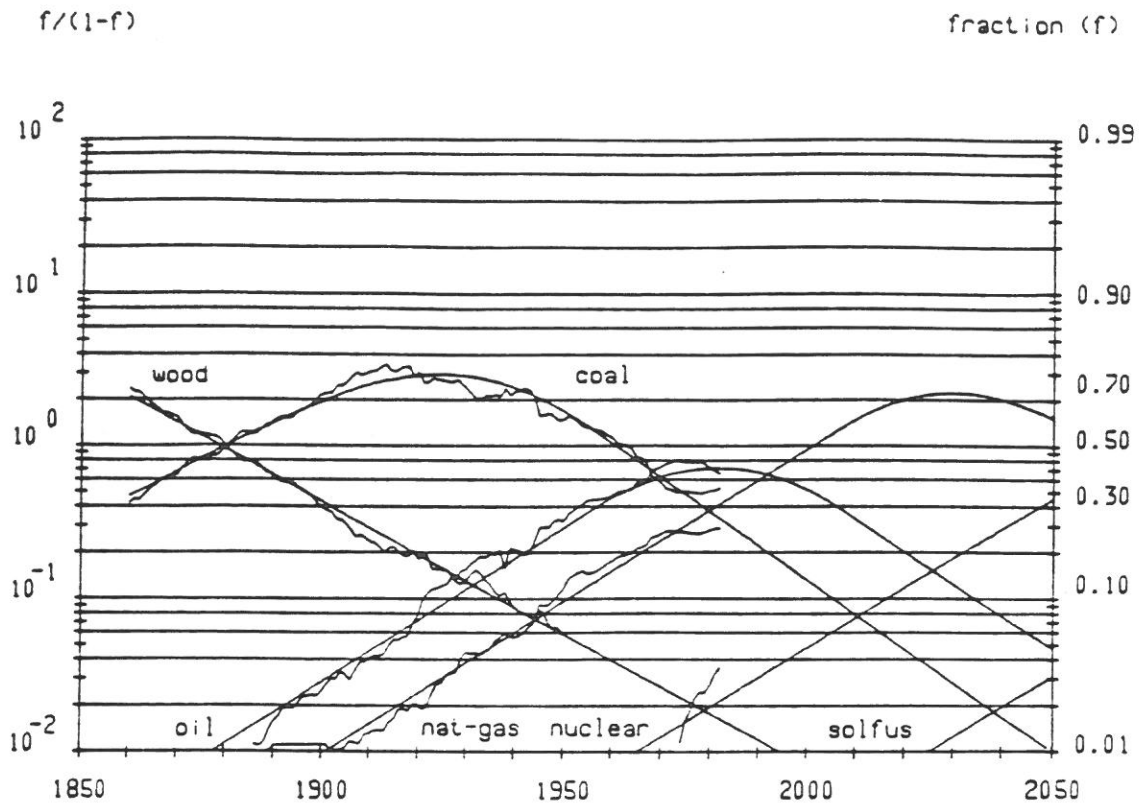


Figure 4. Substitution de l'énergie primaire dans le monde (Grübler et Nakicenovic, 1987, d'après Marchetti et Nakicenovic, 1979)

Evolution des parts de marché des énergies considérées dans la figure 2 dans la transformation $F/(1-F)$ (part de marché d'une source énergétique divisée par la somme des parts de tous les autres agents énergétiques) et à l'échelle logarithmique. Les données du passé servent à déterminer les paramètres du modèle de substitution. On voit qu'on rend ainsi fort bien compte des changements structurels du système énergétique. Pour l'avenir, nous admettons que le taux de croissance de l'énergie nucléaire sera analogue à celui qu'ont connu le charbon, le pétrole et le gaz naturel. La nouvelle énergie qui émergera au XXI^e siècle (que nous appelons Solfus, car il pourrait s'agir aussi bien de l'énergie solaire que de la fusion nucléaire) apparaîtra environ cinquante ans après l'énergie nucléaire.

La substitution régulière des énergies primaires l'une à l'autre fait entrevoir un grand avenir pour le gaz naturel, destiné à être l'énergie dominante du XXI^e siècle. La part du pétrole atteint son stade de saturation et va régresser, l'importance du charbon décroîtra encore davantage. L'énergie nucléaire va fortement ralentir sa croissance, ce qui impliquerait qu'elle ne connaîtra pas de croissance significative jusqu'à la fin du XX^e siècle.

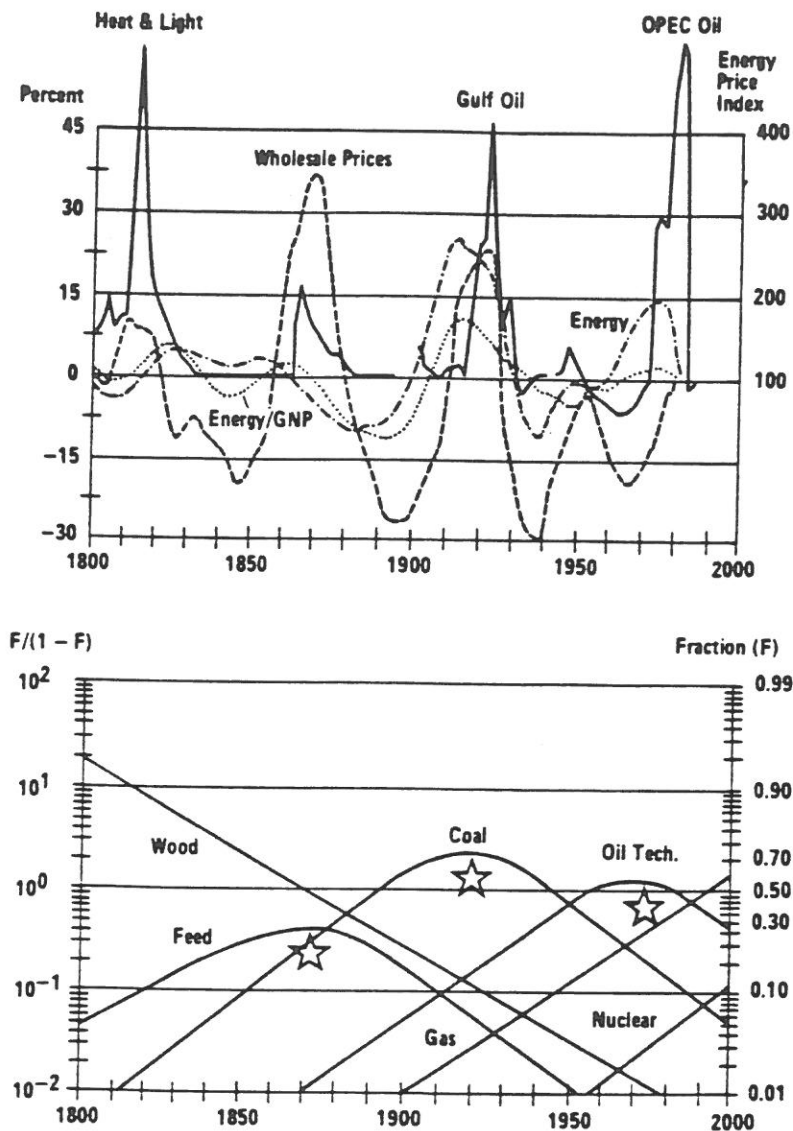


Figure 5. Substitution de l'énergie primaire et cycles économiques de longue durée aux Etats-Unis (Marchetti, 1981, et Nakicenovic, 1986)

Les énergies primaires (bois, foin pour la traction animale, charbon, pétrole, gaz naturel et énergie nucléaire) représentent chacune une série d'industries et de produits. Lorsque le marché en est saturé, il en résulte des crises et des ruptures structurelles (dépressions) au cours desquelles de nouveaux produits, de nouvelles énergies et de nouveaux secteurs industriels apparaissent qui conduiront à une reprise. Ces fluctuations économiques à long terme sont connues en tant que cycles de longue durée. Ces cycles sont relevés par les changements de trois indicateurs (indice des prix de gros, consommation d'énergie et intensité énergétique, c'est-à-dire quantité d'énergie consommée par unité monétaire du PNB), qui font apparaître les variations cycliques.

Lorsque plusieurs industries et produits (y compris l'énergie dominante) parviennent à leur stade de saturation et que la dépression s'installe, la structure du système se rompt. Cette rupture s'accompagne d'une envolée des prix. Les chocs pétroliers des années septante ne surprennent alors plus guère. Marchetti avait déjà prévu en 1980 que les prix du pétrole allaient s'effondrer. D'après le passé, il faudrait s'attendre à ce que les prix du pétrole, en termes réels, restent stables pendant une quarantaine d'années.

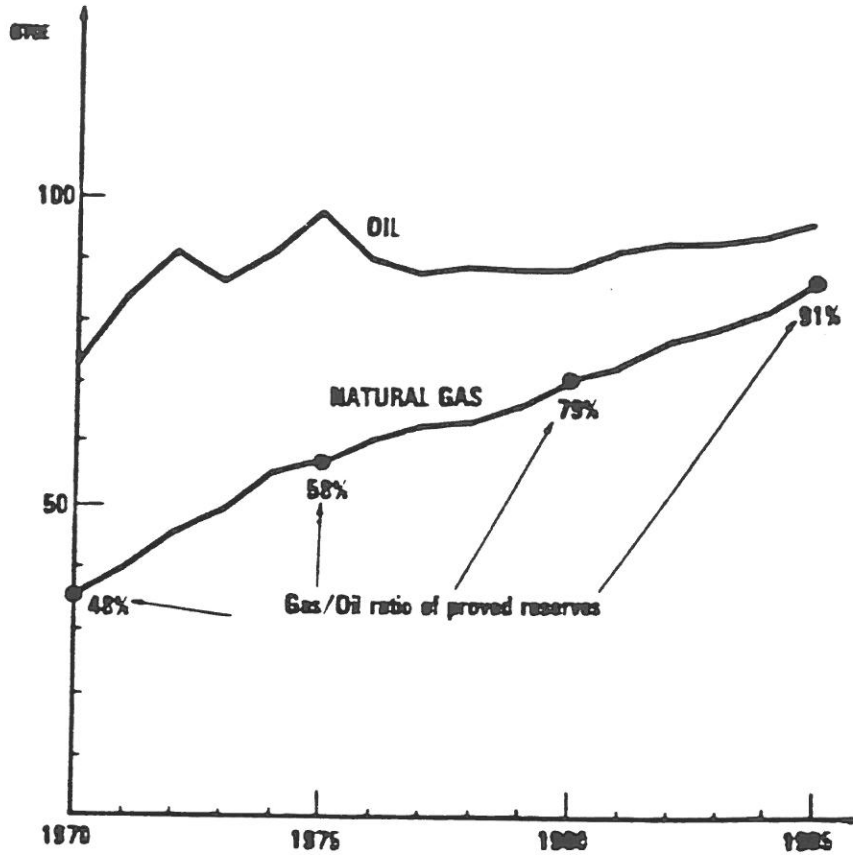


Figure 6. Evolution des réserves de pétrole et de gaz naturel entre 1970 et 1985 (Rogner et autres, 1986)

La forte augmentation des réserves de gaz, comparée à celle des réserves de pétrole, modifie profondément le rapport entre elles. Il faut s'attendre à découvrir d'importantes quantités de gaz supplémentaires. Le gaz naturel est disponible en très grandes quantités et beaucoup de gisements non conventionnels ou à très grande profondeur attendent encore d'être exploités.

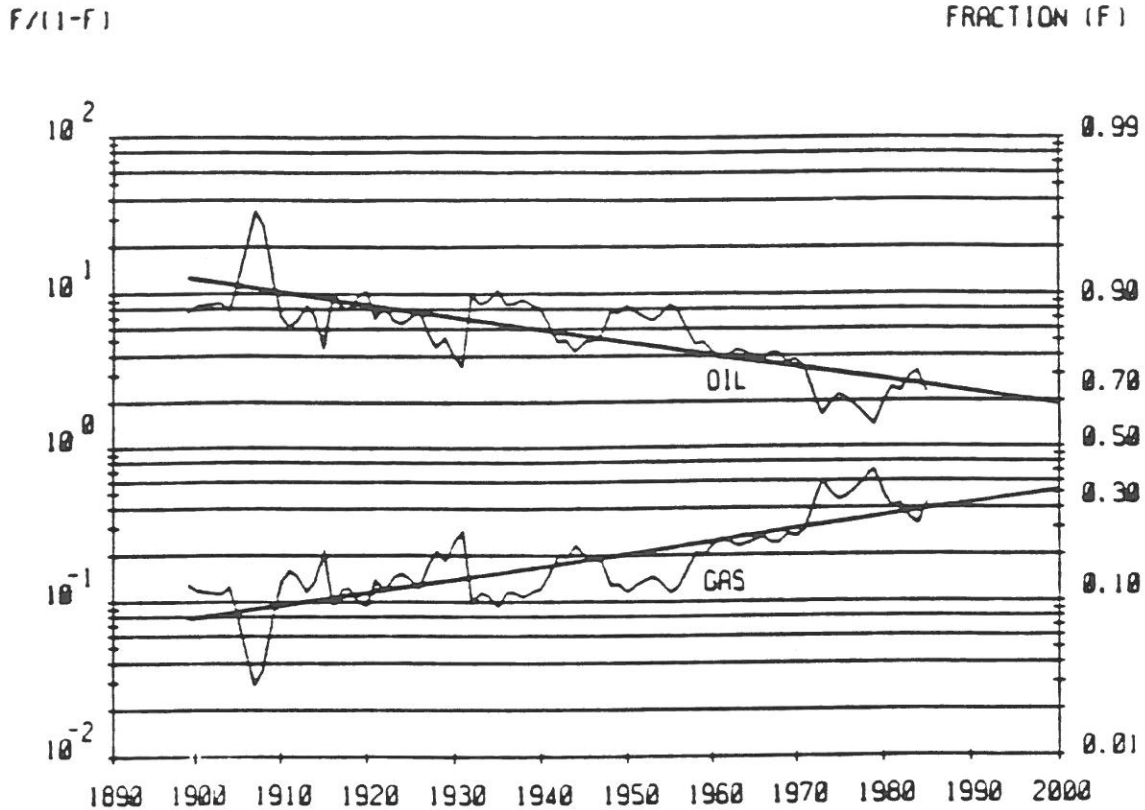


Figure 7. Part des découvertes de pétrole et de gaz dans les forages productifs pratiqués aux Etats-Unis (Grübler et Nakicenovic, 1987)

Découvertes de pétrole et de gaz aux Etats-Unis considérées comme un processus de substitution. Une proportion croissante des forages productifs aboutissent à la découverte de gisements de gaz, quoiqu'on n'ait jusqu'ici pas beaucoup prospecté le gaz pour lui-même. Il faut abandonner le lien étroit qui a existé entre industrie pétrolière et industrie gazière pour tenir compte des propriétés et caractéristiques des gisements de gaz. Une prospection systématique de gaz sera couronnée de succès aussi dans les régions que les prospecteurs de pétrole ont considérées comme improductives.

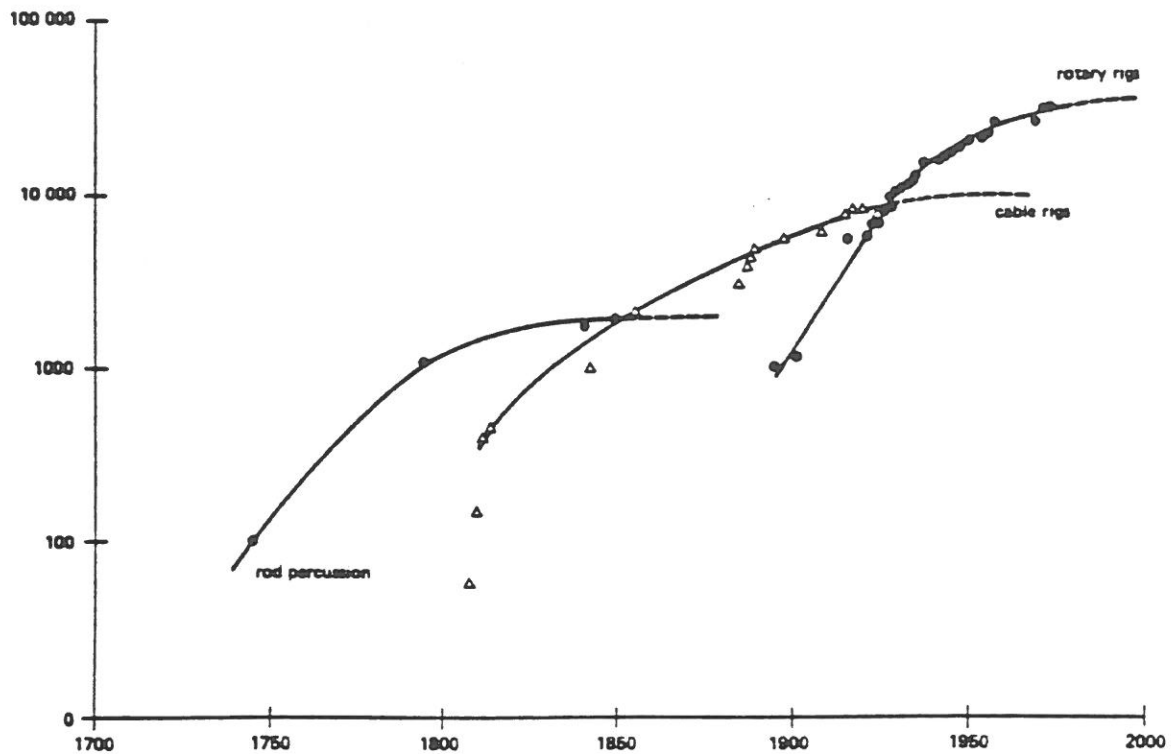


Figure 8. Records des profondeurs de forage atteintes (en pieds) par différentes techniques de forage (Grübler et Nakicenovic, 1987)

L'évolution des techniques de forage permet de descendre à des profondeurs toujours plus grandes. Les chances de trouver du pétrole se raréfient à partir d'une certaine profondeur, tandis que celles d'y trouver du gaz augmentent.

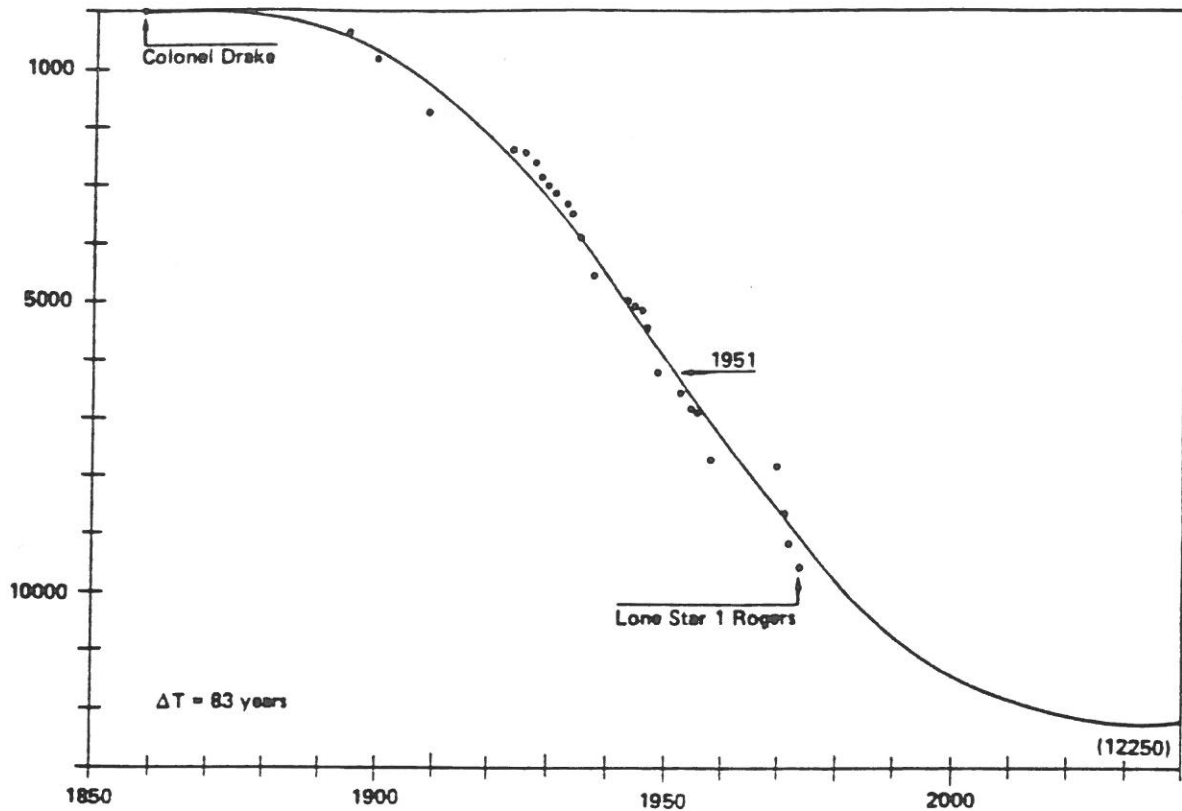


Figure 9. Profondeur maximale atteinte par les forages de reconnaissance aux États-Unis (Grübler et Nakicenovic, 1987)

La courbe d'enveloppe (une fonction logistique) de performance des techniques de forage de la figure 8 montre que des profondeurs de forage de plus de 10 000 mètres seront dans un avenir assez proche non seulement possibles, mais presque quotidiennes. Ce progrès favorise la prospection gazière. Tous les points inscrits sur la courbe depuis 1950 correspondent à des forages de gaz.

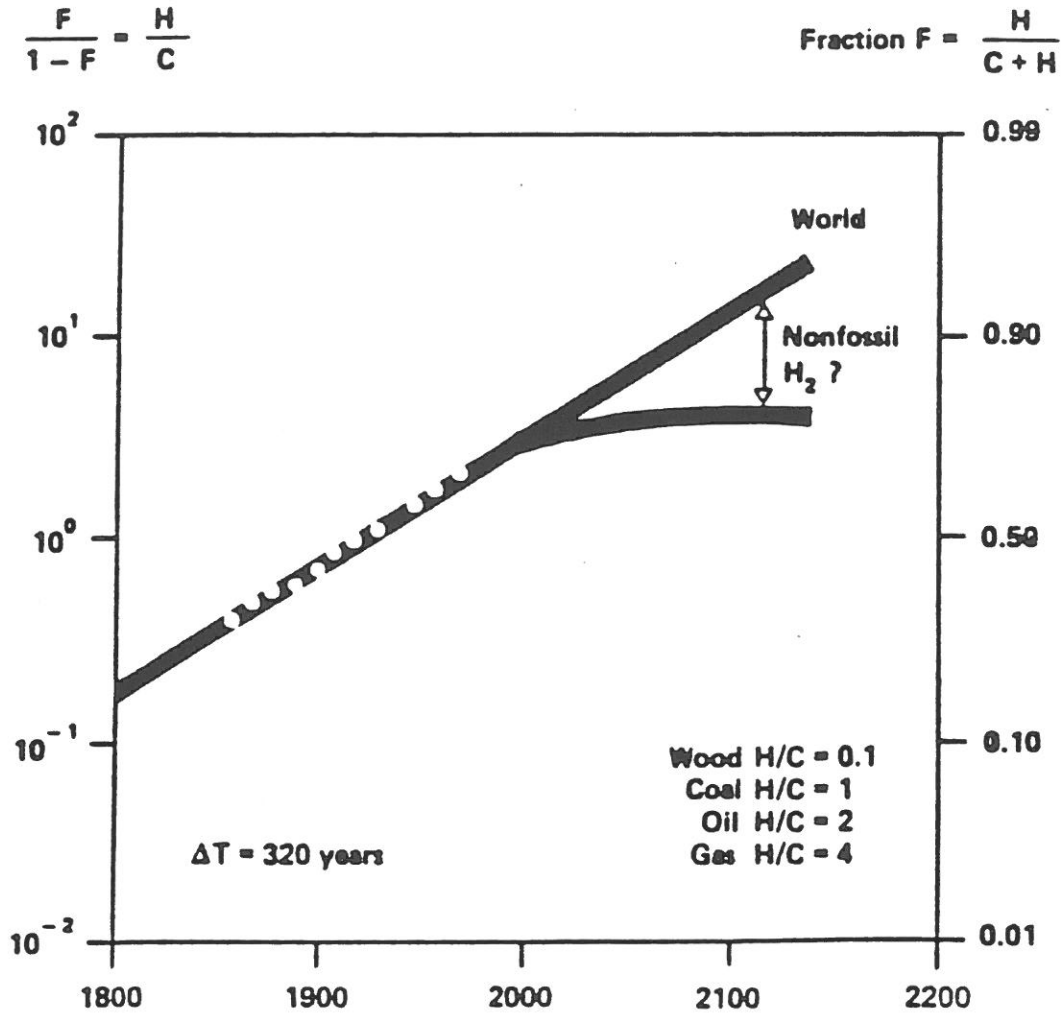


Figure 10. Rapport entre carbone et hydrogène dans la consommation mondiale d'énergie (Marchetti, 1982)

Dans le passé, le système énergétique a évolué en direction d'énergies présentant un rapport hydrogène/carbone plus élevé. Ce rapport est maximal pour le méthane (CH_4). Même si nous projetons cette évolution dans l'avenir et prévoyons un âge du méthane, il faudrait qu'apparaisse progressivement, au siècle prochain, l'hydrogène pur pour que la tendance historique puisse se poursuivre. Pour des raisons écologiques notamment (problème du CO_2), nous prévoyons que l'âge du méthane sera suivi par un âge de l'hydrogène. Les premières voitures à hydrogène roulent déjà dans nos villes. Le développement d'avions hypersoniques, sur lequel on travaille beaucoup actuellement (Orient Express), nécessite un carburant qui soit soit du méthane, soit de l'hydrogène. Le méthane est la source énergétique idéale pour assurer le passage vers un âge de l'hydrogène.