

Un point de vue sur les besoins et les approvisionnements en énergie à l'horizon 2050

Par Pierre-René Bauquis

Professeur Associé à l'Ecole Nationale Supérieure du Pétrole et des Moteurs

Ancien directeur Stratégie et Planification du Groupe TOTAL

Professeur TPA (Total Professeurs Associés)

Bien qu'il existe des scénarios multiples et contrastés, la majorité des prévisionnistes nous indiquent que la consommation d'énergie primaire commerciale devrait environ doubler d'ici 2030, passant de 9 à 18 Gtep et environ tripler d'ici 2050, passant à 25 ou 30 Gtep. Selon ces études les énergies fossiles ne devraient plus représenter en 2050 qu'au mieux les deux tiers de ces consommations contre 85 % actuellement.

L'objet de cet article est de "revisiter" les hypothèses sous jacentes à cette vision de notre avenir sur le prochain demi-siècle et de proposer un point de vue sur le bilan énergétique de la planète en 2050. Ceci peut paraître illusoire, dans la mesure où -par exemple- nous ignorons quel pourrait être l'impact des ruptures technologiques éventuelles au-delà de 2010 ou de 2020, et l'impact des possibles ruptures économiques ou démographiques. Nous ignorons également -et c'est probablement le plus important- si nous allons vers une humanité où les comportements rationnels finiront par déterminer les choix fondamentaux de société ou si l'irrationnel, sous toutes ses formes, gardera une très large place. Cela, nous ne le savons pas, mais l'avenir des énergies en dépend très largement : ce qui importe n'est en effet pas la réalité telle que définie par les scientifiques, mais ce que perçoivent et ce que veulent les hommes. C'est là le cœur même de la démocratie et pour l'avenir des énergies c'est un facteur clef : toute la problématique du "développement soutenable" et les débats relatifs aux problèmes d'environnement en dépendent. L'acceptation ou non des risques liés à l'effet de serre, de ceux liés au nucléaire, de ceux liés aux transports individuels, détermineront la structure de nos consommations énergétiques dans un demi-siècle. De même l'acceptation ou non des risques liés aux modifications génétiques détermineront à ce même horizon les réponses qui seront apportées à la question de la

Nota : L'auteur remercie tout particulièrement pour leurs remarques et suggestions Paul Alba, Emmanuelle Bauquis, Denis Babusiaux, Jean-Claude Boudry, Georges Dupont-Roc, Jacques Foos et Roland Geoffrois.

" concurrence pour la terre " entre biomasses alimentaires et biomasses énergétiques.

La multitude des questions est telle que nous nous contenterons ici de quelques coups de projecteurs sur un petit nombre de questions clefs : la croissance économique, l'avenir démographique, la question des ressources et des réserves de carbone fossile (pétrole, gaz et charbon), la question de l'avenir des énergies renouvelables et de celui des énergies nucléaires. Nous proposerons en conclusion un " bilan énergétique 2050 " qui n'a aucunement la prétention d'être plus exact que tous ceux qui existent déjà mais qui constituera la synthèse de nos réflexions.

LA CROISSANCE ÉCONOMIQUE

On a observé ces vingt dernières années un début de découplage entre croissance économique (mesurée par la croissance des PNB) et consommations énergétiques. Ce phénomène est lié d'une part à la dématérialisation des PNB et d'autre part aux économies d'énergies, c'est-à-dire à l'efficacité énergétique toujours croissante des processus industriels et à l'amélioration de l'efficacité énergétique des consommations liées au chauffage ou la climatisation, à l'éclairage, à l'usage des appareils électroménagers ou des moyens de transports (automobiles, avions, etc.). Il existe cependant un facteur, venant jouer en sens inverse, qui résulte du fait que les augmentations de PNB se traduisent par une demande plus que proportionnelle des besoins ou désirs de transports ou des besoins ou désirs de confort. Ceci est vrai en particulier dans les économies émergentes dont les populations aspirent massivement à un mode de vie et de consommation qui est celui des pays les plus riches. Or ce sont précisément ces économies qui devraient représenter l'essentiel de la croissance économique et démographique du demi-siècle à venir.

Nota : Ce texte a été initialement publié dans la Revue de l'Énergie (numéro spécial 50^{ème} anniversaire N° 509-Sept. 1999). La publication originale ne comportait pas les graphiques et tableaux et l'épilogue a été développé par rapport au texte d'origine

Les résistances idéologiques qui pourraient se mettre en travers de ces aspirations (ultra-écologisme, nouvelles éthiques, relectures des grandes religions) ne paraissent pas aujourd'hui capables de modifier sensiblement ces aspirations véhiculées par une mondialisation des communications ; mais qu'en sera-t-il au-delà de 2020 ?

Personne aujourd'hui ne peut le savoir, et c'est bien là une des difficultés majeures des prévisions à long terme : nous savons extrapoler des tendances par des modélisations plus ou moins élaborées, mais il est dans la nature même des ruptures comportementales de ne pas être modélisables.

L'AVENIR DÉMOGRAPHIQUE

Il n'est pas besoin de disposer de savantes études démographiques pour se souvenir qu'il y a cinquante ans Italiennes et Espagnoles avaient deux ou trois fois plus d'enfants que les Allemandes ou les Suédoises, alors qu'aujourd'hui les filles des mêmes Italiennes ou Espagnoles donnent naissance à encore moins d'enfants que leurs cousines allemandes ou suédoises. En l'absence de mouvements migratoires, elles n'assurent plus le renouvellement des générations.

Ces mêmes phénomènes de rupture dans les comportements en matière de natalité sont apparus plus récemment sur le reste du pourtour méditerranéen, en Tunisie, au Maroc, en Turquie, en Egypte et plus récemment encore mais très vigoureusement en Algérie. On ne voit pas pourquoi ces phénomènes n'iraient pas en s'amplifiant dans les années à venir et ne s'étendraient pas aux autres zones à fortes natalités. La question clef en matière de démographie se résume dans le concept un peu mystérieux du "désir d'enfants", phénomène très fortement culturel et donc rapidement variable à une époque où les schémas culturels évoluent eux-mêmes très vite, ceci même lorsque les schémas religieux restent peu modifiés. Ces schémas culturels sont très largement affaire de médias et sont en particulier liés à la mondialisation de la télévision qui projette déjà dans tous les villages de la planète un modèle d'idéal familial de type nord-américain ou européen.

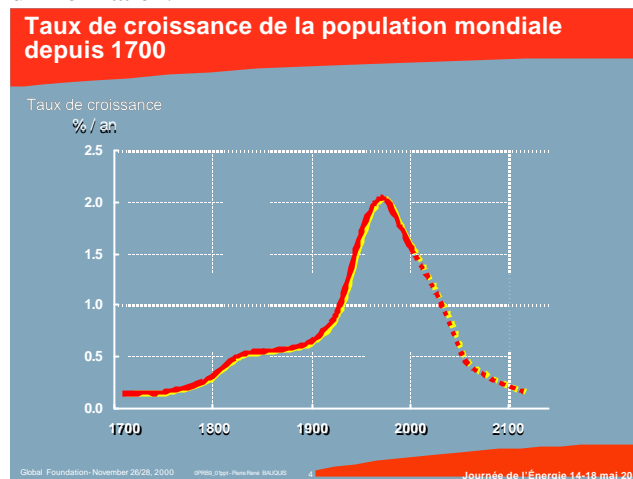
(1) Publications de l'auteur relatives à la question des réserves pétrolières :

Revue de l'IFP, vol. 27, n° 4, juillet-août 1972, pages 631-658 : Les réserves de pétrole et les perspectives de production à moyen et long terme par P.R. Bauquis, R. Brasseur, J. Masseron.

Energies n° 35. Printemps 1998 pages 11 et 12 - L'effet de serre et les réserves énergétiques.

What future for extra heavy oil and bitumen : the Orinoco Case 17th Congress of the World Energy Council, Houston, September 1998

Dans les vingt ou trente années à venir la diffusion d'Internet dans ces mêmes villages viendra encore renforcer la mondialisation des schémas culturels : grâce à l'énergie solaire photovoltaïque que on peut parier que la majorité des tentes touarègues ou yourtes mongoles seront équipés dès avant 2020 de télévisions, de téléphones portables, et d'accès aux réseaux mondiaux d'information.



La question démographique étant au cœur de la problématique des besoins à long terme en matière énergétique, nous risquerons une sorte de pari, venant refléter l'impact possible des remarques ci-dessus : en 2050 la population mondiale sera plus probablement de l'ordre de 8 milliards (± 2 milliards) que de 10 milliards (± 1 milliard) généralement envisagés.

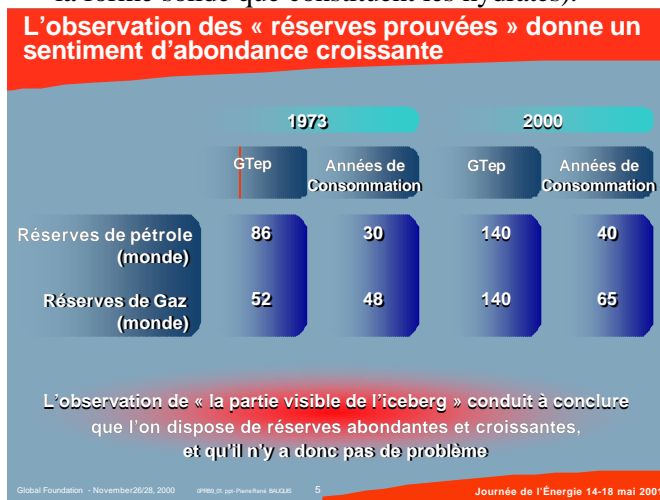
LA QUESTION DES RESSOURCES ET DES RÉSERVES DE CARBONE FOSSILE

Cette question est une des plus controversées au sein des industries énergétiques : pessimistes et optimistes s'affrontent sur ce thème depuis plus de cinquante ans⁽¹⁾. On trouve en effet dès le début des années 1930 des articles sur l'épuisement prochain des réserves pétrolières, mais on trouve aussi en 1999 des articles tout aussi sérieux pour expliquer que ceci est un "faux problème" et qu'étudier l'épuisement des réserves n'a pas vraiment de sens. En effet, la raréfaction des réserves est par définition autocorrectrice, par le biais des hausses de prix engendrant tant la création de nouvelles réserves à partir d'un stock donné de ressources que la réduction de la demande.

- La question des réserves (quantités que l'on peut produire techniquement et économiquement) de carbone

fossile, sous ses formes solides (charbon), liquide (pétrole) ou gazeux (gaz naturel) n'est pas un faux problème, mais un problème réel. Les ressources (quantités totales existantes en terre, qu'elles soient ou non économiquement productibles)

- En revanche pour les formes liquides (pétroles) ou gazeuse les incertitudes sont nettement moins grandes et les "stocks en terre", ou ressources, sont probablement aujourd'hui estimables avec une meilleure précision, disons à plus ou moins 30 % près pour le pétrole et plus ou moins 50 % pour les gaz sous forme gazeuse (mais pas sous la forme solide que constituent les hydrates).



- Dans le cas des pétroles et des gaz dits conventionnels le processus de raréfaction progressive de la découverte de nouveaux gisements a été pratiquement occulté par trois phénomènes : l'ouverture de nouveaux territoires aux investissements internationaux dans le domaine de l'exploration et de la mise en production, la transformation progressive de ressources non conventionnelles en réserves conventionnelles (offshores profonds, ultra lourds, etc.), et surtout la réévaluation importante des réserves des gisements déjà découverts. Ce dernier phénomène a masqué deux faits : d'une part les visions en matière de réserves ultimes récupérables n'ont pratiquement pas changé au cours des 30 dernières années pour les pétroles dits conventionnels, d'autre part l'exploration ne renouvelait plus les volumes consommés.

(1) Publications de l'auteur relatives à la question des réserves pétrolières :

Revue de l'IFP, vol. 27, n° 4, juillet-août 1972, pages 631-658 : Les réserves de pétrole et les perspectives de production à moyen et long terme par P.R. Bauquis, R. Brasseur, J. Masseron.

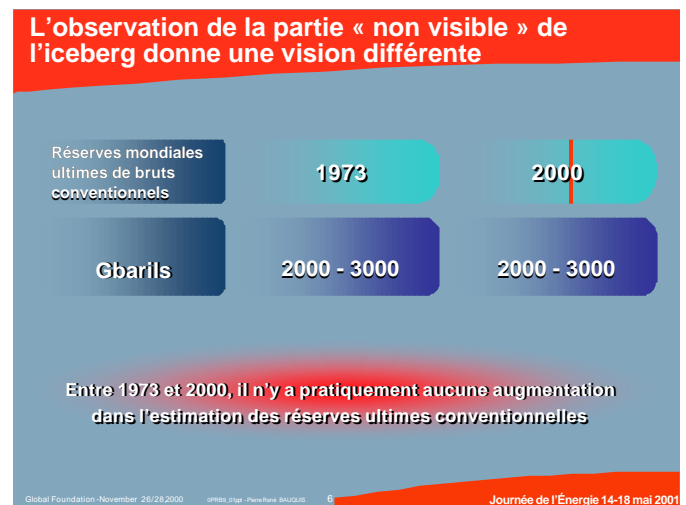
Energies n° 35. Printemps 1998 pages 11 et 12 - L'effet de serre et les réserves énergétiques.

What future for extra heavy oil and bitumen : the Orinoco Case 17th Congress of the World Energy Council, Houston, September 1998

constituent des stocks finis d'énergie solaire concentrée (biomasses fossiles) qu'on ne sait pas mesurer avec précision, en particulier en ce qui concerne les formes solides (charbon, lignite, schistes bitumineux, hydrates de gaz).

Ces phénomènes de réévaluation ont eux-mêmes deux origines inextricablement liées : la sous-évaluation des volumes en place (ressources) au moment de leur découverte, et l'amélioration au cours du temps des taux de récupération espérés grâce à l'évolution technologique.

Au total les phénomènes rappelés ci-dessus expliquent pourquoi il se sera écoulé quelques trente années aux USA entre le moment où les nouvelles découvertes n'arrivaient plus à compenser l'augmentation des consommations (fin des années 30) et le début de la baisse des productions (début des années 70). Il paraît logique de penser que le même phénomène se reproduira à l'échelle de la planète.



- En se plaçant dans une optique de long terme, c'est à dire à l'horizon 2050, la distinction fine des ressources selon leurs catégories physiques (solides, liquides, gaz) n'a qu'un intérêt relatif puisqu'il existe des ponts technologiques permettant de transformer des ressources d'une catégorie en production d'une autre catégorie. En effet, on peut gazéifier du charbon ou des résidus pétro-

liers, et on peut produire des hydrocarbures liquides à partir de gaz (par exemple par conversion en produits pétroliers par des procédés type Fischer Tropsch, ou procédés de production d'oléfines à partir de méthanol, ou même homologation directe du méthane en essences). On a donc un " continuum " de ressources de carbone fossile d'où on pourra extraire une part plus ou moins grande de productions sous la forme que l'on désire pour alimenter les divers marchés, et ceci en fonction des paramètres techniques et économiques qui prévaudront en 2050. Parmi ces paramètres économiques, les contraintes liées à la préservation de notre environnement joueront un rôle majeur, et ceci bien avant 2050. Par exemple si d'ici 2010 ou 2020 apparaît un consensus sur la gravité de l'effet de serre, il faudra –sous une forme ou sous une autre (taxation, permis négociables, etc.)- que se concrétise un " coût " lié à l'émission de carbone dans l'atmosphère, afin que le marché assure une régulation rationnelle de ces émissions. L'apparition d'un coût lié à l'émission de carbone dans l'atmosphère, aujourd'hui jugée comme probable, viendrait handicaper légèrement la gazéification du charbon mais surtout handicaper massivement la "conversion " du gaz en liquides, que ce gaz soit naturel... ou résultant lui-même de processus de gazéification de solides (charbons, goudrons, biomasses, etc.). A l'inverse, ce coût d'émission du carbone viendrait, selon nombre d'auteurs, favoriser l'émergence d'une économie énergétique faisant une large place à l'hydrogène, ce qui suppose que nous sachions maîtriser à des coûts pas trop élevés la réinjection du gaz carbonique.

- En ce qui concerne le passage des ressources aux réserves nous insisterons sur le facteur qui nous paraît être le plus important, celui de la différence entre pétrole et gaz. En matière de pétrole les taux de récupération " naturels " ou primaires sont assez faibles en particulier pour les pétroles lourds : ils sont en fait nettement inférieurs à 30 % aujourd'hui, en moyenne, (toutes qualités confondues). Ils peuvent donc être fortement améliorés dans l'avenir par la technologie, et ceci d'autant plus qu'il s'agira de ressources à forte densité ou à forte viscosité. Il n'en est pas de même en matière de gaz, produit pour lequel cette problématique qualitative n'existe pratiquement pas et pour lequel les taux de récupération

" naturels " sont élevés, de l'ordre de 70 à 80 %, sauf cas marginaux de réservoirs de qualité très médiocre.

Il résulte de ces caractéristiques que dans une optique long terme, type 2050, on tend à sous-estimer les réserves pétrolières en sous-estimant la " création de nouvelles réserves " par amélioration des taux de récupération, en particulier pour les qualités les plus lourdes, comme l'illustre le début de la mise en valeur des bruts ultra-lourds ou bitumes de la ceinture de l'Orénoque au Vénézuéla.

Il en résulte aussi qu'on risque de faire l'erreur inverse concernant les réserves gazières : la technologie ne peut dans ce cas créer de nouvelles réserves par amélioration des taux de récupération, sauf de façon marginale (fracturation et drains horizontaux par exemple dans des réservoirs très peu perméables).

Dans le cas du gaz l'exploration étant moins avancée que pour le pétrole, les découvertes de nouveaux champs font que les statistiques de réserves continuent de croître, et elles pourront encore le faire pendant quelques années, peut être dix ou vingt. En revanche lorsque les consommations deviendront supérieures aux nouvelles réserves apportées par l'exploration, le déclin des réserves sera rapide et inexorable, sans que le progrès technologique ni la hausse des prix liée à la raréfaction n'y puissent rien faire ou presque.

Nous ajouterons quelques mots sur les formes solides du pétrole et du gaz, "réserves de demain" selon nombre d'auteurs. Il s'agit donc de savoir si, à l'horizon 2050 les schistes bitumineux ou les hydrates de gaz pourraient à cet horizon être transformés en réserves pétrolières ou gazières, pour les volumes importants. Nous avons de façon un peu conventionnelle choisi de faire figurer les seuls schistes bitumineux parmi les formes de carbone "solide" et non les sables bitumineux et les pétroles ultra-lourds, même lorsque ceux-ci sont à l'état pâteux ou carrément "figé" du fait des conditions de températures dans les gisements (cas des sables de l'Athabasca au Canada). Cette distinction nous paraît justifiée au moins sur le plan pédagogique, car la différence entre sables bitumineux et schistes bitumineux est importante. Les premiers sont de véritables pétroles bruts, ayant migré, qui se sont "alourdis" par oxydation ou biodégradation alors que les seconds sont en fait du kérogène ou si l'on veut des "roches mères" n'ayant pas achevé la transformation de leur matière organique en pétrole, et donc pour lesquelles les processus d'expulsion et de migration n'ont pas pu prendre place.

Quant à la contribution des schistes et des hydrates aux réserves à l'horizon 2050, nous pensons qu'à cette date ces deux ressources seront probablement encore les "réserves de demain".

L'AVENIR DES ÉNERGIES RENOUVELABLES

La fin du XXème siècle aura été la période de redécouverte de ces énergies ancestrales grâce à de nouvelles technologies de mise en œuvre, et nous sommes encore dans la phase initiale de ce phénomène. Le fait de se situer en ce moment dans une telle phase est peu propice à une bonne évaluation du potentiel de ces énergies au cours du demi-siècle à venir.

En effet dans la phase actuelle de redécollage de ces énergies on peut observer des taux de croissance très élevés, de 20 ou même 30 % par an, sur certaines filières tels le solaire photovoltaïque, l'énergie éolienne ou les biocarburants. La tentation est grande d'extrapoler sur une longue période des tendances récentes sur courte période en oubliant la fragilité de telles extrapolations.

Parmi les questions que pose l'avenir des énergies renouvelables, une des plus importantes est celle des types d'aides qu'il convient de mettre en œuvre pour accélérer leur développement. Tout d'abord en matière de recherches technologiques il convient de ne pas oublier que chaque domaine des connaissances progresse en fonction de sa logique propre, à un moment donné.

Les énergies renouvelables aujourd'hui requièrent des efforts de recherches, mais ces efforts pour être efficaces doivent relever d'une logique très décentralisée et irriguer une multitude de petites équipes. Il ne s'agit donc pas, si on veut être efficace, de crédits massifs venant se déverser sur ce secteur : ce ne sont pas les laboratoires de recherche, ni les entreprises qu'il convient de subventionner, mais pour un temps le prix des énergies qu'elles fourniront sur les marchés.

On est là dans une logique presque aux antipodes de celle de la recherche nécessaire au développement des énergies nucléaires qui, elles, nécessitent le recours à des dépenses massives et fortement centralisées en matière de recherches et de développement.

Électricité d'origine renouvelable en 1995 et 2050 *				
	Puissances installées MW		Électricité générée TWh	
	1995	2050	1995	2050
Hydraulique	700.000	1.000.000	2.400	3.000
Éolien	5.000	200.000	10	500
Biomasse (filiales élect.)	10.000	100.000	50	500
Géothermie	7.000	20.000	30	100
Solaire (photovoltaïque)	600	30.000	1	100
Solaire thermique	-	-	10	50
Total	722.600	1.350.000	2.501	4.250

* Équivalence retenue pour l'électricité : le nucléaire et les renouvelables ont été comptabilisés comme s'ils avaient été générés par une filière thermique avec un rendement de 40 % (convention utilisée par le groupe TOTAL) dont plus de 95 % de « grande hydraulique ».

Global Foundation - November 20/28, 2000 www.global-foundation.com 7 Journée de l'Énergie 14-18 mai 2001

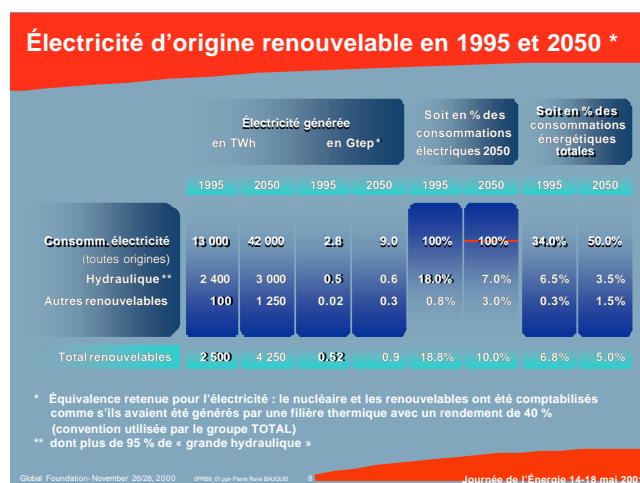
En ce qui concerne les énergies renouvelables la bonne approche est celle des « certificats verts » ou autres méthodes analogues permettant d'ajouter une

prime à la valeur de l'électricité produite par les filières renouvelables ou seulement certaines de ces filières si l'on veut cibler fortement ces mécanismes d'aide. Nous ne passerons pas en revue les diverses filières des énergies renouvelables, et présenterons directement nos propres conclusions.

Celles-ci sont résumées sous forme de deux tableaux de synthèse relatifs au bilan des énergies renouvelables qui seraient converties en électricité à l'horizon 2050 et comparant celui-ci au dernier bilan cohérent, relatif à l'année 1995. En première approche ce bilan devrait recouvrir environ les 4/5 des énergies renouvelables consommées à l'horizon 2050.

La conclusion à tirer des deux tableaux ci-dessus est qu'à l'horizon 2050 les énergies renouvelables –hors grande hydraulique- n'auraient qu'un rôle d'appoint en matière de bouclage des bilans énergétiques. Même avec un effort important force est de constater qu'entre 1995 et l'an 2050 la part des énergies renouvelables dans les bilans électriques devrait décroître... et non pas croître sensiblement comme beaucoup le pensent.

Ceci ne signifie pas qu'il ne faille pas s'y intéresser, bien au contraire, mais il ne faut pas pour autant penser que ces énergies offrent une alternative crédible à l'autre famille d'énergies non fossiles que constituent les énergies nucléaires. Il existe cependant une possibilité de croissance nettement plus forte des énergies renouvelables que ce que nous avons envisagé ici, qui serait celle d'une percée technologique des modifications génétiques venant bouleverser les perspectives en matière de biomasses. A fortiori la mise au point de la synthèse chlorophyllienne pourrait, elle aussi, avoir un impact majeur.



L'AVENIR DES ÉNERGIES NUCLÉAIRES

Nous utiliserons ici tout à la fois le singulier et le pluriel mais la conclusion de ce paragraphe indiquera pourquoi nous avons choisi une formulation plurielle dans notre titre. Tout d'abord rappelons le bilan de cette énergie à ce jour : elle assure 18 % de la production électrique mondiale, soit 6 % de la consommation énergétique.

Globalement, le parc mondial actuel de centrales nucléaires est de type relativement homogène, puisqu'il s'agit pour la quasi totalité de centrales à fission "classiques", non surgénératrices, avec des variantes de filières dans lesquelles nous n'entrerons pas sauf pour rappeler le poids très dominant de l'une d'entre elles, celle des centrales à eau pressurisée (PWR). Ces centrales utilisent des cycles à uranium enrichi et des combustibles soit classiques à 3,5 % d'uranium 235 soit de type MOX incorporant du plutonium. Elles sont d'un très bon niveau de fiabilité. Cette industrie n'a connu qu'un seul accident majeur au niveau mondial : celui de la Centrale de Tchernobyl, que les hommes du nucléaire qualifient "d'accident soviétique" et non "d'accident nucléaire". Cependant par cette formule ils mettent en évidence le possible talon d'Achille des centrales nucléaires en matière de fiabilité : ce n'est pas d'une défaillance technique que pourrait provenir un risque majeur, mais plutôt de conditions humaines ou politiques aberrantes (attentats, guerres civiles ou non civiles, etc.). Nous savons par contre calculer le risque de défaillance d'une centrale exploitée dans des conditions normales, risque mesuré en termes de probabilité de décès entraîné par une telle défaillance. On sait ramener ces risques proprement techniques à des niveaux inférieurs à ceux permettant à n'importe quelle autre grande activité industrielle d'opérer, sans parler de risques acceptés beaucoup plus élevés comme la consommation du tabac, l'usage de la voiture automobile ou la profession de plombier-zingueur.

Une autre objection classique faite au nucléaire est relative aux inconnues des fins de cycles : que faire des combustibles irradiés, -retraités ou pas-, stockage des déchets, démantèlement des centrales et autres installations nucléaires après leur fin de vie. Sur ces questions, il y a clairement un défaut de communication de l'industrie nucléaire qui sait déjà ou saura résoudre ces problèmes soit en ayant recours à des techniques déjà au point, soit dont on est raisonnablement certains qu'elles pourront l'être dans des délais

satisfaisants, et à des coûts tels qu'ils ne remettent pas en cause les ordres de grandeur des prix de revient du kWh nucléaire.

La troisième grande question est celle des réserves en combustibles fossiles, c'est à dire avec les cycles actuels, celle des réserves en uranium. Il se trouve heureusement que l'on peut abaisser très fortement la "teneur de coupure" ou richesse minimum des minerais exploités (à la limite, l'eau de mer est un minerai d'uranium), sans accroître fortement le prix de revient du kWh nucléaire, le coût du combustible entrant pour un faible pourcentage dans ce prix de revient.

Deuxièmement, si le renchérissement lié à la raréfaction des ressources devenait une contrainte, on devrait pouvoir en 15 ou 20 ans relancer la filière des surgénérateurs qui permettent de multiplier de façon très importante, (de l'ordre de 30 à 40 fois) la quantité d'électricité produite à partir d'une quantité donnée d'uranium. A ce sujet il est surprenant de voir abandonné le prototype le plus élaboré au plan mondial de cette filière, c'est à dire la Centrale Superphénix. Sachant qu'un problème de réserves d'uranium pourrait se poser vers 2050 et que par ailleurs ce type de réacteur devrait contribuer à la solution des problèmes de "fin de cycle" des combustibles nucléaires, il paraît difficile de comprendre la rationalité de cette décision. La logique et l'application "du principe de précaution" face au risque de l'effet de serre auraient voulu au contraire que cette centrale soit exploitée sur longue période et au maximum de sa capacité d'utilisation jugée "sûre" par les autorités compétentes. Ceci aurait permis de tirer sur 30 au 40 années toutes les leçons d'une véritable utilisation industrielle : évaluation des coûts réels d'exploitation et de maintenance, problèmes de vieillissement, de fiabilité, etc. La valeur d'une telle expérience aurait largement justifié une exploitation à long terme de cette centrale, même si cette exploitation avait entraîné un coût annuel net, ce qui en marginal paraît d'ailleurs peu vraisemblable.

Enfin l'avenir du nucléaire, à long terme, ne se réduit pas aux seuls cycles déjà actuellement prouvés au plan industriel. Il y a tout d'abord le besoin de disposer d'ici 2010 ou 2020 de centrales nucléaires de petites puissances (100 à 500 MW), de grande fiabilité et faciles à opérer : la filière haute température avec refroidissement à l'hélium paraît aujourd'hui bien pla-

cée pour répondre à ces besoins. On peut par ailleurs envisager des cycles différents, qui diminueraient encore les risques de surchauffe et de fusion du cœur d'un réacteur, tel celui proposé par le prix Nobel de physique Carlo Rubia : il s'agit de réacteurs dits "à spallation" dont le fonctionnement nécessite un flux extérieur de particules et qui donc s'arrêteraient automatiquement dès que l'on sortirait d'une certaine plage de conditions opératoires. Il y a ensuite pour le très long terme la fusion : sans entrer dans les débats relatifs à la « fusion chaude » et ceux ayant trait à la « fusion froide », on peut cependant penser que ces énergies viendront probablement à leur tour sur le long terme élargir la riche palette des énergies nucléaires. Voilà pourquoi nous avons préféré la forme plurielle d' "énergies nucléaires" plutôt que de recourir au singulier dans le titre de ce paragraphe.

En résumé il paraît impossible de considérer l'énergie nucléaire comme un accident de l'histoire énergétique sans lendemain : celle-ci sera à nouveau au cœur de nos préoccupations bien avant 2050.

UNE VISION DU BILAN ÉNERGÉTIQUE MONDIAL À L'HORIZON 2050

Nous partirons de l'approche suivante : nous essaierons d'évaluer quelles pourraient être les productions des diverses énergies fossiles en 2050, compte tenu des réserves et des coûts, et par différence avec une fourchette d'évaluation des besoins d'énergie, quelles devraient être les quantités à fournir à cet horizon par les énergies non carbonées.

Voyons donc tout d'abord ce que pourraient être en 2050 les productions d'énergies fossiles.

En ce qui concerne le charbon, les contraintes ne sont pas liées aux "ressources" (quantités en terre) mais aux réserves d'une part (quantités économiquement exploitables en 2050) et aux problèmes de contraintes d'émission de gaz carbonique d'autre part, sans oublier les émissions de soufre, de méthane, de particules et de cendres, facteurs de pollutions non seulement locales mais également régionales et planétaires. On peut en effet retenir l'essentiel des particules émises dans de futures centrales électriques fonctionnant au charbon (en particulier si on recourt à la gazéification) mais on ne peut les retenir pour des millions de foyers domestiques. La même chose est vraie pour le soufre, et en ce qui concerne le méthane il ne faut pas oublier qu'une exploitation charbonnière

est un gisement de “coal bed methane ” produisant directement dans l’atmosphère.

Compte tenu des coûts très élevés de la logistique charbonnière terrestre, encore plus élevée à l’unité d’énergie transportée que celle du gaz, une bonne partie des ressources ne seront pas convertissables en réserves à l’horizon 2050, même en tenant compte du potentiel de production convertissable en électricité sur les lieux de production (avec ou sans gazéification). Par ailleurs, et c’est probablement le plus important, les renseignements dont on dispose sur les réserves de charbon laissent supposer des confusions entre réserves et ressources. Il serait temps que cette industrie s’astreigne à faire cette distinction sur des bases raisonnablement homogènes avec celles utilisées par les gaziers, qui par contre ne publient presque rien sur leurs ressources...

Du fait de ces divers facteurs et sans qu’il soit possible d’entrer ici dans une démonstration, la production mondiale de charbon et lignite pourrait passer de 4,8 Gt (soit 2,2 Gtep/an) à une fourchette de 8 à 10 Gt (soit 4 à 5 Gtep/an), à l’horizon 2050 : ceci suppose, et c’est là une hypothèse discutable, que les contraintes relatives à l’émission de CO₂ dans l’atmosphère n’auront pas un impact majeur. Nous faisons donc le pari que les hommes accepteront un risque « effet de serre » bien supérieur à ce qui paraît aujourd’hui comme « raisonnablement acceptable ».

En ce qui concerne le pétrole, nous pensons que les contraintes liées à la question des réserves commenceront à se manifester assez rapidement, disons entre 2010 et 2020. En effet, à cet horizon, il sera devenu clair pour la majorité des observateurs que les nouvelles découvertes ne pourront plus renouveler les consommations et que la croissance des réserves et des productions repose essentiellement sur deux phénomènes : l’accroissement des réserves des gisements conventionnels déjà découverts et la transformation croissante de ressources non conventionnelles en réserves conventionnelles (essentiellement les bruts ultra lourds et les bitumes, pour 500 à 1000 milliards de barils de nouvelles réserves d’ici 2050 et les offshore profonds et ultra profonds pour 100 à 200 milliards de barils). Cette prise de conscience devrait anticiper la raréfaction physique par des effets de hausses de prix venant limiter les niveaux de production : nous pensons que la production mondiale actuelle de 3,7 Gtep pourrait au mieux aug-

menter d’un peu plus de 30 % pour atteindre un pic de 5 Gtep entre 2010 et 2020 avant de décliner assez rapidement vers 4,5 Gtep en 2030. En 2050 cette production d’hydrocarbures liquides devrait se trouver ramenée à un niveau proche du niveau actuel, soit quelques 3,5 Gtep, auxquelles pourraient s’ajouter des quantités relativement marginales provenant de la conversion en liquides pétroliers de gaz naturel ou de gaz de synthèse (obtenus à partir de charbon, de biomasse ou de déchets). Le scénario ci-dessus paraît cohérent avec ce que l’on sait aujourd’hui non seulement des réserves prouvées de pétrole mais des ressources et des réserves ultimes.

En ce qui concerne le gaz naturel, notre connaissance plus imprécise du volume en terre des “ressources ultimes ” rend plus incertaines les prédictions. Cependant là aussi le problème en matière de réserves se posera lorsque se fera la prise de conscience que les découvertes ne remplacent plus les consommations. Après une impression de grande abondance en matière de réserves qui devrait durer jusque vers 2010-2020 l’acuité de la prise de conscience pourrait être plus vive encore que pour le pétrole du fait du moindre jeu de la réévaluation des réserves des gisements déjà découverts que pour le pétrole. Rappelons en effet que des deux facteurs sous jacents à ces réévaluations, c’est à dire la sous-estimation ou sous déclaration initiale et le jeu de l’amélioration des taux de récupération, seul le premier joue en pratique pour le gaz. Ceci ne veut pas dire que ce jeu soit sans importance : il a par exemple été majeur dans le cas de Groningue dont les “réserves initiales ” ont triplé en 30 ans. En revanche il a été pratiquement nul pour Frigg ou pour Lacq dont les réserves réelles –bien connues puisque les deux gisements sont désormais épuisés ou presque- sont en gros identiques aux estimations données dès les premières années de production. La première question à se poser est donc de savoir si Urengoï et les gisements de la péninsule de Yamal ou North Dome-South Pars se comporteront en matière de réserves comme Groningue ou comme Frigg... Nous pensons que dès avant 2010 la seconde hypothèse sera la bonne et que le jeu des réestimations ultérieures sera très limité. La seconde question à se poser en matière de gaz est de savoir si l’exploration à finalité gazière nous réserve dans les vingt ou trente années à venir l’équivalent dans le monde d’une dizaine de nouvelles provinces du type de celle de la Bolivie... ou une cinquantaine. Notre sentiment penche pour la première de ces hypothèses.

ses. Un autre facteur viendra limiter le “pic ” des productions gazières au plan mondial, à savoir la rigidité physique des chaînes gazières et l’importance des investissements liés à ces chaînes. Dans la pratique, on ne développera pas des nouveaux grands pipelines ou des nouvelles usines de liquéfaction pour des situations dans lesquelles ces infrastructures ne seraient pas correctement utilisées pour une trentaine d’années en moyenne. Le pic ou plutôt le plateau de production maximum de gaz, dont la durée pourrait être de 30 à 40 ans, devrait être atteint vers 2015-2025 et durer jusque vers 2050-2060 avant que ne s’amorce le déclin de la production mondiale de gaz. Ce déclin pourrait encore être retardé si l’exploration des tranches profondes des bassins sédimentaires réservaient d’importantes surprises ou si les évolutions technologiques permettaient à cet horizon de convertir les ressources d’hydrates en réserves : ces deux possibilités paraissent dotées d’une faible probabilité.

On peut chiffrer ce plateau au double ou un peu plus du double des productions mondiales actuelles, soit environ à 4,5 Gtep/an. D’après nos estimations précé-

entes le panorama des productions d’énergies fossiles en 2050 pourrait donc se présenter comme suit : charbon 4,5 Gtep, Pétrole 3,5 Gtep et Gaz 4,5 Gtep, soit un total d’énergies fossiles de 12,5 Gtep. Face à ces 12,5 Gtep, la demande à satisfaire serait -selon les scénarios classiquement avancés de l’ordre de 25 à 30 Gtep- et selon notre perspective plus modeste –en particulier du fait d’hypothèses démographiques moins élevées (8 Ghab ± 2 versus 10 ± 1)- de l’ordre de 18 Gtep (soit quand même le double des 9Gtep actuelles). Avec cette hypothèse, le déficit à combler par les énergies non carbonées serait encore considérable, de l’ordre de 5.5 Gtep.

Si, comme nous l’avons estimé, les énergies renouvelables ne peuvent apporter qu’une contribution de l’ordre de 1 à 1,5 Gtep, on voit que le déficit à combler dès 2050 par les énergies nucléaires serait de l’ordre de 4 à 4,5 Gtep, donc majeur. L’ensemble de ces conclusions peut se résumer dans le tableau de synthèse ci-après.

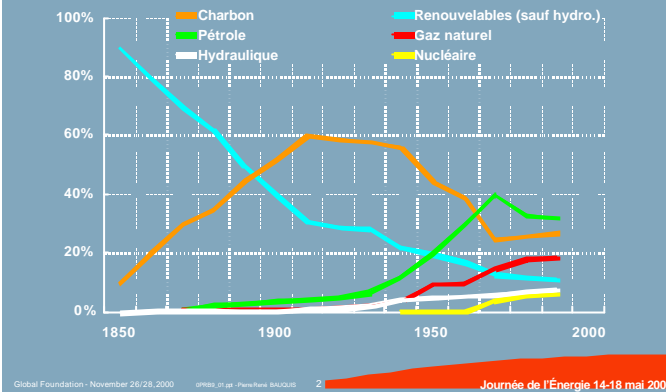
Une vision des bilans énergétiques 2000 - 2020 - 2050

Source : Revue de l’Énergie, 50 ans, n° 509 Sept. 99

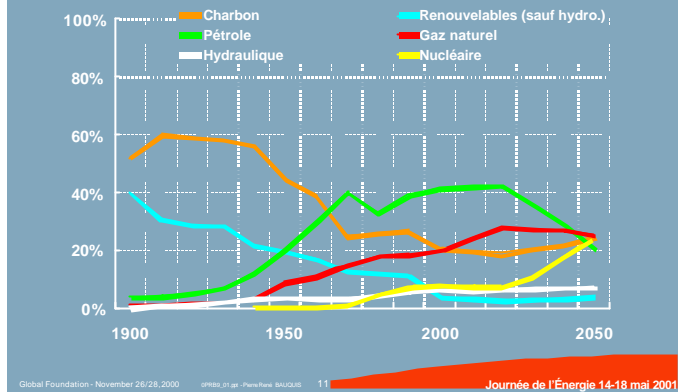
	2000		2020		2050	
	Gtep	%	Gtep	%	Gtep	%
Pétrole	3.7	40	5.0	40	3.5	20
Gaz	2.1	22	4.0	27	4.5	25
Charbon	2.2	24	3.0	20	4.5	25
Ensemble énergies fossiles	8.0	86	12.0	87	12.5	70
Renouvelables dont filières électriques	0.7 (0.5)	7.5	1 (0.7)	6.5	1.5 (0.9)	8
Nucléaire	0.6	6.5	1	6.5	4	22
Total toutes énergies	9.3	100.0	14.0	100.0	18.0	100.0

Global Foundation - November 26/28, 2000 0PRB9_01.ppt Pierre René BAUQUIS 9 Journée de l’Énergie 14-18 mai 2001

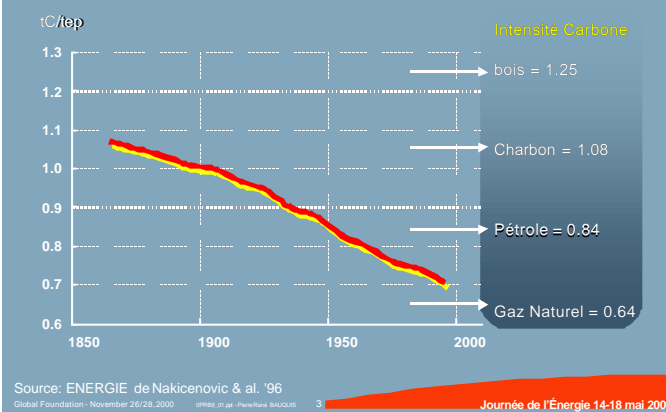
Sources d'énergies primaires (monde) : 1850 - 1990



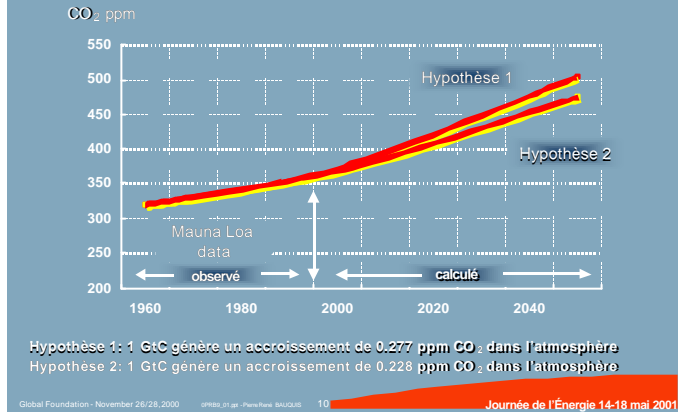
Sources d'énergies primaires (monde) : 1900 - 2050



Contenu en carbone des différentes sources d'énergie - Consommation mondiale 1850 - 1990



Évolution estimée des émissions de CO₂



EPILOGUE

Nombre de problèmes importants pour l'évolution des industries énergétiques sur le court ou le moyen terme ont été délibérément écartés des thèmes évoqués ici. Ainsi nous n'avons pas parlé des questions de géopolitique, de la concentration géographique des réserves, des fusions et acquisitions, ni de la diversification des activités des sociétés pétrolières, gazières ou électriques. Nous n'avons pas non plus évoqué la riche problématique de la séquestration du carbone : pièges à carbone forestiers, « décarbonisation » des hydrocarbures, injection du gaz carbonique dans les aquifères ou les grands fonds marins, centrales électriques à oxygène afin de ne pas diluer le gaz carbonique par l'azote de l'air, et nombre d'autres thèmes connexes. Ces thèmes, pour intéressants qu'ils soient, nous ont en effet paru relativement secondaires quant à la problématique du mix énergétique à l'horizon 2050.

Nous n'avons pas non plus évoqué la question de la compétition entre génération électrique centralisée (grands barrages, grandes centrales au charbon, au gaz, ou nucléaires) et décentralisée (énergies renouvelables, piles à combustibles, petites cogénérations, microturbines... ou même microcentrales nucléaires). Cette question ne nous semble pas non plus devoir être déterminante quant au mix énergétique à l'horizon 2050. Ce point de vue peut surprendre, mais il ne faut pas oublier que les microturbines, comme probablement les piles à combustibles fixes consommeront essentiellement du gaz naturel. De même les piles à combustibles embarquées (automobiles) seront probablement des piles à hydrogène, mais cet hydrogène sera lui-même très probablement produit à partir d'hydrocarbures. Rappelons que pour produire en pratique de l'hydrogène... il faudra produire massivement du gaz carbonique. En effet la source de cet hydrogène la plus plausible sera le reformage (ou autre conversion chimique) soit de liquides pétroliers ou dérivant du pétrole si cette conversion se fait à bord

des véhicules, soit de gaz si la production d'hydrogène se fait en amont des véhicules dans les stations de distribution, soit plus en amont encore dans des centrales génératrices d'hydrogène où on pourra le produire à partir de pétrole, de gaz, de charbon ou de biomasse. Comme l'objectif sera probablement de « séquestrer » le gaz carbonique (réinjection, etc.) pour éviter de le renvoyer dans l'atmosphère, on voit l'intérêt de générer cet hydrogène « en amont » des véhicules et non à bord de ceux-ci.

Seule une véritable panique relative aux conséquences de l'effet de serre (qu'il s'agisse d'effets réels ou supposés) et des coûts très élevés de séquestration du gaz carbonique pourraient justifier un recours rapide à l'autre filière potentielle de génération d'hydrogène, c'est-à-dire un recours à la filière nucléaire. Dans un tel scénario catastrophe –au demeurant très improbable- la demande d'énergie électrique d'origine non fossile, donc essentiellement nucléaire, viendrait à exploser. On regretterait alors amèrement d'avoir perdu vingt ou trente années d'expérience du cycle des surgénérateurs.

Nous voudrions pour conclure insister sur deux points qui nous semblent essentiels quant à l'avenir des diverses énergies.

Le premier point est celui des teneurs en gaz carbonique de l'atmosphère dans les prochaines décennies et des conséquences potentielles en matière de changements climatiques. Nous avons illustré graphiquement les conséquences en matière de teneur en CO₂ de l'atmosphère de notre vision 2020-2050 du mix énergétique mondial : la hausse de cette teneur, déjà passée en moins de deux siècles de 280 à 360 ppm, se poursuivra pour atteindre quelques 500 ppm à l'horizon 2050 (disons 450 à 550 ppm en 2050).

Nous pensons que cela est désormais pratiquement inévitable, quelles que puissent être les politiques qui seraient mises en œuvre dans les vingt ans à venir, du fait de la grande inertie des systèmes énergétiques (effets de parc majeurs, tant en ce qui concerne les systèmes de consommations que les systèmes de productions énergétiques). Nous ignorons largement les effets climatiques potentiels de telles teneurs en CO₂, alors que celles-ci n'avaient pas dépassé 300 ppm au cours des 400.000 dernières années, pourtant riches en variations climatiques. Malgré les progrès

de la modélisation climatique, il y a là une inconnue majeure. Mais, quelles que soient les conséquences, mineures, importantes ou même catastrophiques, il va falloir nous adapter.

Le second point qui nous paraît important à souligner est celui d'une complémentarité croissante à l'avenir des énergies fossiles et des énergies nucléaires. Cette complémentarité est dès aujourd'hui claire en ce qui concerne les usages respectifs de ces deux familles de ressources énergétiques. Les hydrocarbures liquides ont en effet une triple vocation naturelle :

- une vocation de matière première (pétrochimie, chimie, solvants, etc.) ;
- une vocation majeure pour la fonction de mobilité (terrestre, aérienne, maritime) liée à leur très forte « compacité énergétique » ;
- une vocation pour l'approvisionnement des besoins énergétiques « hors réseaux » (usines isolées, fermes, plantations, etc.) mais relativement importants, liée au bas coût de transport des hydrocarbures liquides ;

Pour les faibles demandes ce seront les énergies renouvelables et en particulier le solaire photovoltaïque qui devraient s'imposer

Quant au nucléaire, sa vocation quasi exclusive aujourd'hui et pour les vingt ou trente ans à venir est la production d'électricité là où les besoins sont importants et suffisamment concentrés.

Si on se projette vers 2050, de nouvelles complémentarités devraient apparaître entre énergies fossiles et nucléaires. Il faudra en effet pousser toujours plus avant les taux de récupération des gisements pétroliers, en particulier de ceux contenant des bruts lourds ou ultra lourds, et peut-être même recourir –comme au début du 20^{ème} siècle- aux schistes bitumineux. Pour réaliser ceci en émettant un minimum de CO₂ on peut présager que le recours à des calories « non fossiles » sera nécessaire et que ces calories seront – d'une façon ou d'une autre- d'origine nucléaire. Le même raisonnement devrait s'appliquer aux procédés « Gas to liquids » (GTL) dont l'autoconsommation énergétique dans leurs variantes actuelles (35 à 45 % d'autoconsommation) rendra leur développement non économique si des contraintes pénalisant les émissions de CO₂ venaient à se développer.

Là aussi l'apport de calories nucléaires -ou directement d'hydrogène d'origine nucléaire^(*)- devrait offrir une solution élégante, assurant une longue pérennité aux hydrocarbures liquides quelles que soient les filières d'utilisations finales : moteurs à combustion interne, turbines, piles à combustibles... ou même utilisations spécifiques de simple combustion.

Une autre complémentarité entre hydrocarbures et hydrogène d'origine nucléaire devrait se développer lorsque le coût de ce dernier deviendra compétitif par rapport au coût complet (c'est-à-dire intégrant les externalités tels les coûts éventuels d'émission de CO₂) de l'hydrogène produit à partir d'énergies fossiles. Cette complémentarité serait la fourniture d'hydrogène aux grands centres de raffinage et de pétrochimie, tant pour les besoins d'« upgrading » de bruts lourds ou ultra-lourds que pour les besoins d'allègement et de désulfuration poussée des diverses coupes pétrolières ou pétrochimiques.

Cependant, même si grâce au nucléaire on peut espérer disposer, vers 2050, d'hydrogène en quantités massives et à un coût raisonnable, cet hydrogène devrait rester un « mauvais » vecteur énergétique pour les raisons de fond déjà explicitées...

^(*) Il existe déjà un prototype de réacteur nucléaire expérimental « HTTR » dédié à la production d'hydrogène : ce réacteur de 30 MW de puissance thermique a divergé au Japon en 1998 ; après des difficultés il aurait redémarré en 2000.

On peut alors se prendre à rêver d'autres complémentarités entre une industrie nucléaire source d'hydrogène et l'industrie pétrolière : la meilleure façon de « compacter » énergétiquement l'hydrogène serait en effet de lui adjoindre du carbone, en recréant synthétiquement des hydrocarbures.

Ce serait là une version écologique du procédé Fisher Tropsch !

Au-delà de ces remarques qui peuvent paraître quelque peu paradoxales –et qui sont contraires aux pensées dominantes du temps présent– nous soulignerons pour terminer que même si l'effet de serre ne venait pas engendrer des contraintes majeures quant à nos sources d'énergies à l'horizon 2050 -et c'est bien ce que nous avons supposé en acceptant une croissance relativement forte du charbon pour pouvoir « boucler les bilans »- on voit apparaître au-delà de 2020 un véritable basculement des grands équilibres énergétiques. Après une phase de croissance forte des hydrocarbures (pétrole et gaz) jusque vers 2020, c'est le nucléaire qui dès 2030 est contraint de prendre le relais de la satisfaction de l'accroissement de nos besoins d'énergies. Mieux vaut le savoir et donc s'y préparer.

Du bon usage de chaque source d'énergie

1. Les hydrocarbures liquides sont des ressources limitées et mieux vaut les utiliser essentiellement là où leurs caractéristiques de haute densité énergétique et de richesse chimique sont pleinement valorisées, c'est-à-dire :
 - ⇒ les transports (terrestre, aériens, maritimes)
 - ⇒ comme matière première (pétrochimie, chimie, bitumes, solvants, etc.)
2. Pour les usages thermiques y compris la production d'électricité, l'utilisation d'hydrocarbures liquides n'est pas une bonne valorisation (sauf cas des « fonds de baril », ou cas de consommateurs éloignés des réseaux énergétiques ou ceux dont les réseaux d'approvisionnement sont défaillants)
 - ⇒ les hydrocarbures gazeux sont une meilleure solution dans certains cas et pour le court et moyen terme mais après 2050, il y aura très probablement des problèmes de ressources
 - ⇒ le nucléaire est la meilleure solution dans d'autres cas dès aujourd'hui (pays développés à bonne culture de sûreté) et devra l'être de façon très large à l'horizon 2020 - 2050 (besoin de petits réacteurs « fail safe »)

Les complémentarités vers 2050 et au-delà

1. Pour produire des hydrocarbures difficiles à extraire des roches les contenant, il faudra beaucoup d'énergie (vapeur ou autre injectée dans les gisements, traitements thermiques en surface dans le cas d'exploitation de type minier). Si on veut limiter la production de CO₂ ces calories pourraient être d'origine nucléaire (réacteurs HTR?).
 - ⇒ Nouvelles améliorations des taux de récupération dans les grands gisements pétroliers classiques et a fortiori dans ceux d'huile lourde ou ultra lourde (Athabasca, Orénoque) grâce aux « calories nucléaires »
 - ⇒ Possibilités de production économique des schistes bitumineux ou des hydrates de gaz ??
 - ⇒ Possibilité d'amélioration des procédés GTL (gas to liquids) ou de « liquéfaction du charbon » en utilisant l'hydrogène de source nucléaire : ce serait le Fisher Tropsch écologique
2. Par ailleurs, l'hydrogène d'origine nucléaire pourrait devenir disponible pour les besoins du raffinage et de la pétrochimie

Quelques paradoxes sur l'hydrogène et le développement durable

1

Hydrogène et fondamentaux économiques

1. L'hydrogène est et restera cher à produire, tant aujourd'hui que demain :

- Aujourd'hui et jusque vers 2030-2050, il sera produit à partir d'énergies fossiles, à un coût de l'ordre de 5 à 10 fois (par unité d'énergie) celui des énergies fossiles servant à la produire.
- Demain, disons après 2030, il sera progressivement produit à partir du nucléaire, soit par la voie électrolytique, soit par des voies thermiques directes de décomposition de l'eau.

2. L'hydrogène est cher à transporter et à stocker, et le restera

- Aujourd'hui comme demain, son transport par conduite coûte et coûtera 10 à 15 fois plus cher à l'unité d'énergie transportée que celui des hydrocarbures liquides (les lois de la thermodynamique sont ce qu'elles sont).
- Le stockage (soit sous pression, soit cryogénique, soit sous formes chimiques, soit adsorbé) peut voir son coût abaissé... mais restera beaucoup plus cher que celui des hydrocarbures liquides.

P.R. BAUQUIS - 18 mai 2001

Journées de l'Énergie 14-18 mai 2001

Quelques paradoxes sur l'hydrogène et le développement durable

2

L'hydrogène et ses utilisations

1. Pour les usages calorifiques (chaudières industrielles, vapeur, électricité, chauffage, climatisation, etc.)

- l'hydrogène est un « vecteur » moins intéressant que l'électricité : électricité et gaz naturel sont du même ordre de coûts en matière de logistique/transport, soit en quantités massives, soit en réseaux finaux tandis que l'hydrogène est et restera 3 à 4 fois plus cher à transporter et à distribuer que le gaz naturel.

2. Pour les usages de mobilité (transports routiers, aviation, transports maritimes)

- L'avantage de l'hydrogène réside dans l'absence de pollution urbaine (qu'on l'utilise dans des moteurs à explosion, des turbines ou des piles à combustible). Par contre, les coûts élevés de logistique et de stockage dans les véhicules automobiles/avions/navires font que pour les usages de mobilité, l'hydrogène conservera son handicap de faible concentration énergétique volumique et de coût élevé de stockage.

3. Pour les usages de mobilité la meilleure façon d'utiliser l'hydrogène serait probablement de le « carboner » pour en faire des hydrocarbures de synthèse

P.R. BAUQUIS - 18 mai 2001

Journées de l'Énergie 14-18 mai 2001