



HAL
open science

Quelles énergies pour les transports au XXI e siècle ?

Pierre-René Bauquis

► **To cite this version:**

Pierre-René Bauquis. Quelles énergies pour les transports au XXI e siècle ? : Cahiers de l'Economie, Série Analyses et synthèses, n° 55. 2004. hal-02468327

HAL Id: hal-02468327

<https://ifp.hal.science/hal-02468327>

Preprint submitted on 5 Feb 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ÉCOLE DU PÉTROLE ET DES MOTEURS
INSTITUT FRANÇAIS DU PÉTROLE
228-232, avenue Napoléon Bonaparte
92852 RUEIL-MALMAISON CEDEX
téléphone : 01 47 52 62 80 - télécopieur : 01 47 52 70 82

Quelles énergies pour les transports au XXI^e siècle ?

Pierre-René BAUQUIS

Janvier 2004

Les cahiers de l'économie - n° 55

Série Analyses et synthèses

La collection "Les cahiers de l'économie" a pour objectif de présenter des travaux réalisés à l'Institut français du pétrole, travaux de recherche ou notes de synthèse en économie, finance et gestion. La forme peut être encore provisoire, afin de susciter des échanges de points de vue sur les sujets abordés.

Les opinions émises dans les textes publiés dans cette collection doivent être considérées comme propres à leurs auteurs et ne reflètent pas nécessairement le point de vue de l'École du pétrole et des moteurs ou de l'IFP.

Pour toute information complémentaire, prière de contacter :
Denis **Babusiaux** - Tél. 01 47 52 62 80

Résumé

Après quelques rappels historiques, l'auteur a développé une vision prospective des diverses solutions possibles pour satisfaire les besoins en énergie du secteur des transports au cours du XXI^e siècle.

Pour les transports routiers, il ressort que deux grands types de réponses sont possibles :

- celle, actuellement en vogue, d'un recours massif au nouveau « couple magique » qui serait constitué par l'hydrogène associé aux PAC (piles à combustibles).
- celle, peu médiatisée, d'un large recours aux hydrocarbures de synthèse accompagné d'une forte pénétration de l'électricité par le biais de véhicules hybrides rechargeables.

La thèse de l'auteur est que la seconde possibilité devrait l'emporter.

Cette opinion repose sur une analyse économique qui fait ressortir les très importants handicaps de la voie hydrogène, handicaps qui, selon l'auteur, relèvent de la thermodynamique et ne pourraient donc être surmontés par les progrès des technologies.

Quelles énergies pour les transports au XXI^e siècle ?

par Pierre-René Bauquis

Professeur associé à l'Ecole Nationale Supérieure du Pétrole et des Moteurs (IFP School)
Ancien Directeur Stratégie et Planification du Groupe TOTAL
Email: pr_bauquis@hotmail.com

A James Lovelock.

Des dangers de la prospective :

"Dangereuse, puante, inconfortable, ridicule assurément, vouée à l'oubli rapide, telle est la voiture automobile qu'en Allemagne MM. Benz et Daimler viennent de présenter au Kaiser Guillaume" (G. Clémenceau, *La Justice*, 1882, cité par Rougemont).

Introduction

La révolution industrielle des XIX^e et XX^e siècles a été marquée par une modification radicale des transports. Le XX^e siècle en particulier a vu l'extraordinaire développement de l'automobile et de l'aviation, modes de transport reposant presque exclusivement sur l'utilisation de carburants pétroliers.

Il en résulte qu'à l'échelle mondiale, les consommations énergétiques du secteur des transports représentaient en l'an 2000 1,9 Gtep (1,9 milliard de tonnes équivalent pétrole), soit environ 20 % des consommations énergétiques mondiales (9.3 Gtep d'énergies commerciales produites et consommées en l'an 2000).

Plus de 95 % des consommations d'énergie du secteur des transports sont assurées par le pétrole, pour environ 1.8 Gtep (sur un total de 3.7 Gtep de production mondiale d'hydrocarbures liquides en 2000). Les transports, dont la consommation de produits pétroliers représentait environ un tiers de la production mondiale de pétrole au moment du premier choc pétrolier (1973) en représentent donc désormais environ la moitié (47 à 51 % selon les sources et les modes de calculs utilisés).

A eux seuls, les transports terrestres représentent plus de 75 % des

consommations mondiales d'énergie liées au secteur des transports.

Lorsqu'on tente d'analyser ce que pourrait être l'avenir des transports au cours du XXI^e siècle, et en particulier des transports terrestres, on voit émerger deux questions essentielles :

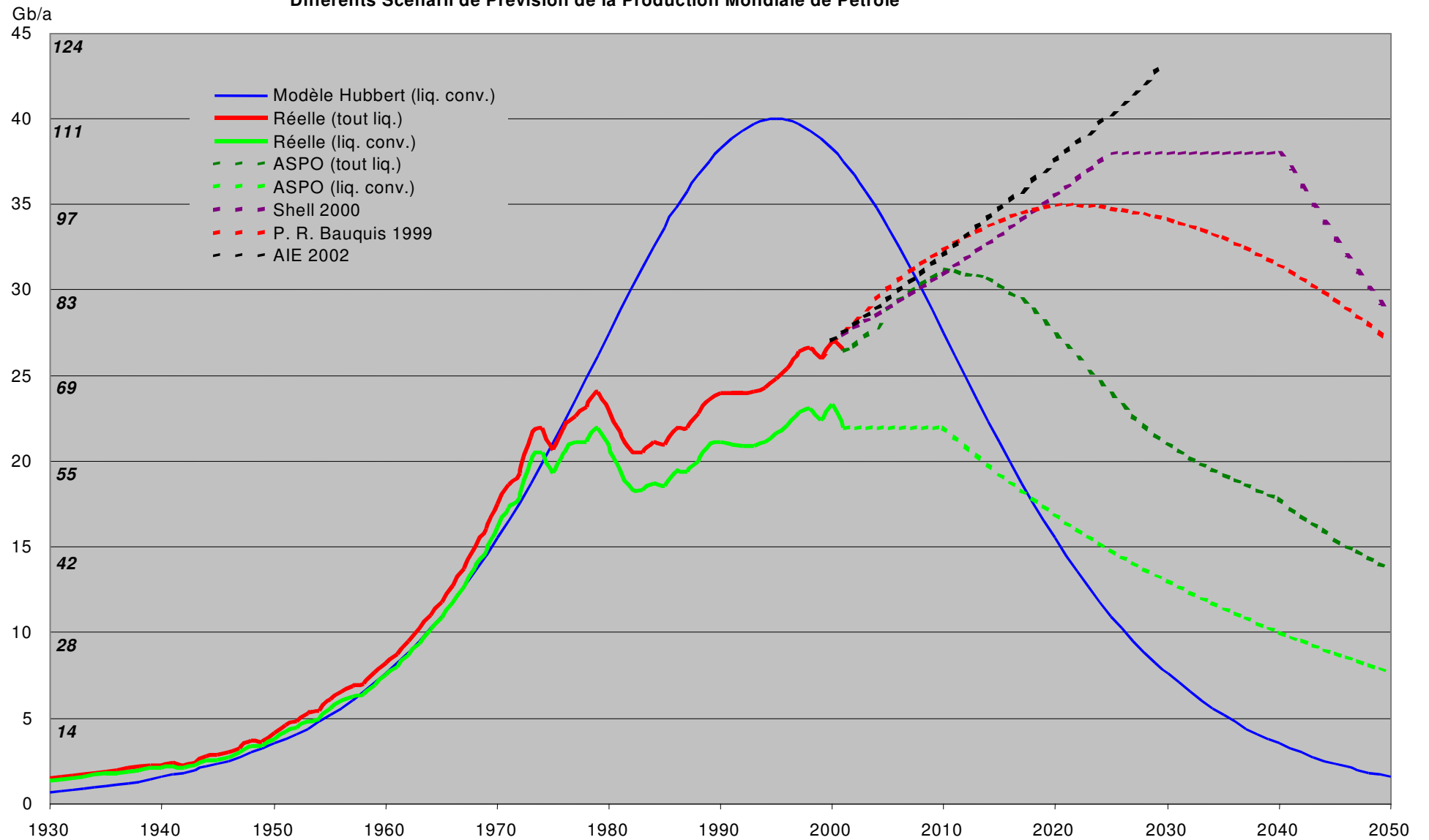
- Comment assurer les besoins en énergie de ce secteur face au futur déclin des productions pétrolières, (qu'elles soient dites conventionnelles ou non conventionnelles) ? L'état actuel de ce problème dit du « pic » de la production mondiale est résumé dans l'illustration n° 1 (voir Nota).

* Nota : L'auteur a publié en 1999 un article consacré en partie au sujet du pic puis du déclin de la production pétrolière mondiale, intitulé "Quelles énergies pour le moyen terme (2020) et le long terme (2050) ?".

Cette publication se trouve dans la *Revue de l'Energie* (numéro spécial 50^e anniversaire n° 509 – septembre 1999).

Le présent article est un prolongement des réflexions présentées dans cet article de 1999.

Différents Scénarii de Prédiction de la Production Mondiale de Pétrole



Source : ASPO Uppsala 2002 press release - USGS mean estimates 2000 (Shell) - Auteur

* Meilleure adéquation d'une courbe de Hubbert basée sur les estimations actuelles des réserves.

PRB/VL

Illustration n° 1

- Comment assurer une maîtrise progressive des émissions de gaz à effet de serre, et en particulier du CO₂, par le secteur des transports au cours du XXI^e siècle ?

L'objet du présent article est de répondre essentiellement à la première de ces questions, mais cette réponse ne peut être dissociée d'une analyse portant sur la question des émissions de gaz à effet de serre.

La question de l'avenir des transports terrestres présente d'autres aspects importants, tel l'aménagement des espaces urbains, le rôle des transports collectifs ou la question des accidents automobiles. Ces questions ne seront pas traitées dans le présent article. La question des « besoins de transports », sous-jacente à la question des besoins en énergie pour les transports, est la plus délicate : le danger de la prospective est de tomber dans les ornières de l'utopie sociale ou de l'utopie technologique.

Une multiplicité de congrès, conférences, articles sont consacrés à la question des transports du futur, et en particulier au futur de l'automobile. La plupart de ces articles ou conférences se limitent à un horizon de temps relativement court, et peu s'intéressent à la période postérieure à 2020. Il s'en dégage actuellement un message dominant : les problèmes du futur des transports terrestres seraient résolus par un nouveau "couple magique", celui de l'hydrogène marié aux piles à combustibles (PAC).

Avant de tenter d'explorer si l'avenir à long terme (2020-2050) et à très long terme (2050-2100) devrait conduire à l'émergence dominatrice de ce nouveau couple magique, il est bon de se pencher sur le passé pour mieux comprendre pourquoi et comment s'est imposé le "couple magique" actuel des transports terrestres : celui des moteurs à combustion interne et des carburants pétroliers (essence et diesel).

Un peu d'histoire

Pendant des millénaires, les hommes ont développé les transports reposant sur la force musculaire animale. Ils ont en particulier amélioré simultanément les caractéristiques des chevaux et de leurs modes d'attelage au cours des derniers 40 ou 50 siècles.

Dès les premiers balbutiements de la machine à vapeur, le rêve de son utilisation pour les transports terrestres se fit jour. Ce rêve se concrétisa dans la première révolution des transports, celle des chemins de fer à vapeur. Cette longue évolution est jalonnée par la machine de Denis Papin (1698), puis celle de Cugnot (1769) suivies de celles de James Watt et de Murdoch (toutes deux vers 1780). La suprématie en matière de machines à vapeur revint finalement aux Anglais. C'est probablement pour cela que les trains roulent à gauche dans la majorité des pays.

Cependant c'est un Français, Amédée Bollée, qui porta à leur apogée les essais de transposition de la traction à vapeur aux véhicules automobiles. Le 9 octobre 1875, il relia Le Mans à Paris avec son "Obéissante" après avoir obtenu le premier "permis de circuler sur route". Malgré ce permis, il récolta 75 contraventions sur son chemin, que le Préfet de Police, inconscient du dangereux précédent, fera "sauter" deux jours après l'arrivée à Paris de l'"Obéissante".

J'ai cité un peu longuement cette anecdote car elle illustre le fait que les succès ou les modes d'un moment ne sont pas les ressorts du long terme. Ceux-ci dépendent en fait des "potentiels de performances technico-économiques", concept un peu abstrait, mais point de passage obligé pour qui veut s'astreindre à une prospective ne reposant pas uniquement sur la boule de cristal ou sur les modes du moment (les versions politiquement correctes ou médiatiquement séduisantes).

Ainsi, si 1875 marquait à la fois l'apogée et la fin prochaine de l'automobile à vapeur, c'est parce qu'un concurrent très discret venait d'apparaître. En effet, le 16 janvier 1861, Beau de Rochas déposait le brevet du

premier moteur à explosion à quatre temps. En même temps, Pierre Michaux mettait au point le premier "vélocipède à pédales". Un philosophe des transports pourrait voir dans cette coïncidence plus qu'un hasard, les deux inventions ayant en commun de transformer en mouvement rotatif continu des poussées alternatives de haut en bas !

Dans les vingt années qui suivirent, l'automobile telle que nous la connaissons, ou presque, était née. De cette période faste émergent quelques grands noms auxquels on doit les premiers véhicules de série : Gottlieb Daimler et Carl Benz en 1886, Panhard et Peugeot en 1891, Rudolf Diesel en 1897, Louis Renault en 1898...

Mais la suprématie du moteur à explosion ne fut pas immédiatement établie. En effet, durant les vingt dernières années du XIX^e siècle, on allait assister à une lutte au coude à coude entre ces premières "voitures à pétrole" et les voitures électriques.

Il ne faut pas oublier que la première voiture à atteindre les 100 km/heure était électrique (la "Jamais Contente" de Camille Jenatzy à Achères, près de Paris, en 1898). Il ne faut pas oublier non plus qu'à la veille de perdre cette lutte, tout comme la voiture à vapeur en 1875, la voiture électrique semblait devoir l'emporter. Au "concours des voitures 2 places" organisé en 1898 par le tout jeune Automobile Club de France, c'est la voiture électrique qui domina largement. Ceci nous vaudra un article à méditer du meilleur chroniqueur scientifique de l'époque, *H.E. Hospitalier*, dans "*La Nature*" du 9 juillet 1898 (ancêtre de la presse écologique). Dans cet article il est écrit qu'« il est désormais acquis que le fiacre à moteur à essence ne saurait constituer un système d'exploitation de voitures publiques dans une grande ville ». Là encore, l'événement immédiat occultait la compréhension des tendances fondamentales. Ce journaliste sembla avoir raison durant quelques brèves années, puisqu'en 1901 une "Krieger" électrique parcourut 307 km (Paris-Châtelleraut) sans recharge. Puis, tout comme les véhicules automobiles à vapeur, les véhicules électriques disparurent ou

presque, ne conservant que quelques microniches dans la vaste arborescence évolutive des transports terrestres.

Durant le XIX^e siècle, ingénieurs et inventeurs avaient exploré presque toutes les méthodes possibles de propulsion automobile : les véhicules à gaz comprimé (David Gordon 1825, Samuel W. Wright 1828), à air sous pression (Carl Hoppe 1862) et même à ammoniac (Charles Tellier 1867). Le plus surprenant est que le premier brevet de moteur à explosion (dû au Suisse Isaac de Rivaz), datant de 1805, est relatif à un moteur fonctionnant à l'hydrogène.

Il convient également de rappeler que les premiers véhicules hybrides "essence-électricité" furent étudiés de 1901 à 1906 par Champrobert. Ces lointains ancêtres de l'actuelle Toyota Prius furent abandonnés à cause de leur complexité et de leur fragilité, mais le concept était bien le même qu'aujourd'hui. En effet la "voiture mixte" de 6 chevaux conçue par Champrobert était dotée d'un moteur à essence qui maintenait en charge des batteries électriques, et ces batteries actionnaient une motorisation électrique qui entraînait les roues. L'objectif était déjà de permettre au moteur à explosion de fonctionner à un régime continu ou quasi continu, afin d'en optimiser le rendement.

De cet immense bouillonnement intellectuel et technique des origines de l'automobile, nous garderons en mémoire quatre avancées symboliques par le fait qu'elles sont, de nos jours, toujours au centre des réflexions quant aux énergies qui propulseront les véhicules routiers dans le futur (cf. Illustration n° 2).

Ce rappel historique illustre en effet les principales réponses possibles aux questions qui se posent pour les automobiles de demain et d'après-demain : quelles énergies, pour quelles motorisations ?

Quels besoins d'énergies pour les transports de demain ?

Une tentative de réflexion sur les véhicules de demain (2020-2050) et d'après-demain (2050-2100) repose sur diverses approches possibles : faut-il partir des technologies, c'est-à-dire de ce que nous savons pouvoir réaliser aujourd'hui et de ce que nous pouvons espérer mettre au point demain comme solutions "économiquement acceptables" ? Faut-il partir des ressources énergétiques à notre disposition aujourd'hui et demain ? Faut-il partir des contraintes environnementales (locales comme globales) et de leur poids toujours croissant ?

En fait la prospective oblige à une approche combinant ces trois aspects fondamentaux, afin d'essayer de dégager une ou plusieurs visions plausibles.

Mais auparavant, nous rappellerons ce que sont aujourd'hui les automobiles, leurs parcs actuels et leurs grandes caractéristiques d'utilisation, caractéristiques dont résultent leurs besoins énergétiques.

L'automobile d'hier et de demain : quelques dates clés

Hydrogène

1805

Le premier moteur à explosion fonctionnait à l'hydrogène: Isaac de Rivaz (Suisse)

Charbon

1892

Le premier moteur Diesel fonctionnait au charbon pulvérisé
Brevet de Rudolf Diesel (Allemand)

Electricité

1899

La première voiture à dépasser les 100 km/h était électrique la « jamais contente » de Camille Jenatzy (Français)

Biocarburants

1903

Le record mondial de vitesse est obtenu par une Gobron-Brillié à éthanol agricole (177 km/h) (Français)

Les technologies automobiles du futur ont presque toutes une longue histoire...

Illustration n° 2

Le secteur des transports en l'an 2000

	Le secteur des transports dans le monde (*)		Le secteur des transports en France (*)	
	MTEP	%	MTEP	%
Transports routiers	1 500	80	40	76
Transports aériens	200	10	6	12
Transports maritimes	100	5	3	6
Transports autres	100	5	3	6
	1 900	100	52	100
Consommation énergétique totale	9 300		200	
Transports en % du total	20%		25%	

(*) Valeurs arrondies
(pour des valeurs précises et détaillées, on se rapportera au World Energy Outlook 2000 de l'AIE).

Illustration n° 3

L'illustration n° 3 montre que la France possède une structure des consommations énergétiques en matière de transports similaire à la structure mondiale.

Si l'on veut porter un regard prospectif sur le long terme (2050) et le très long terme (2100) des transports, un second élément de "cadrage" apparaît nécessaire : c'est celui des hypothèses retenues en matière de population, de consommations énergétiques globales et de développement économique à ces mêmes horizons. Ces éléments sont résumés dans l'illustration n° 4. Pour le passé, les données sont les statistiques AIE ou OCDE arrondies aux chiffres significatifs ; pour le futur, ce sont celles de l'auteur. Ces données de cadrage font ressortir deux grands phénomènes qui devraient marquer le XXI^e siècle :

- Le très fort ralentissement de la croissance démographique mondiale. Certains auteurs prévoient même une décroissance de la population mondiale après 2050.
- Le relatif ralentissement de la croissance économique mais surtout la "dématérialisation" de celle-ci et la forte baisse de son "énergivoracité", c'est-à-dire du montant des quantités d'énergies consommées par quantités de richesses ou d'unités de PNB mondial.

On pourrait naturellement discuter à l'infini ces grandes hypothèses et balayer de multiples scénarios, mais au prix d'un paysage obscurci ou même illisible en ce qui concerne l'avenir du secteur des transports. L'avantage d'une vision centrale simpliste mais unique, aussi discutable soit-elle – à condition de n'être pas absurde – est de pouvoir être utilisée pour tenter d'analyser le futur. Ce cadrage de la démographie, de l'énergie et de l'économie aux horizons 2050 et 2100 permet d'établir une vision globale des besoins énergétiques du secteur des transports, résumée dans l'illustration n° 5 :

- Nous avons tout d'abord supposé que les transports terrestres restent dominants en matière de besoins énergétiques tout au long du XXI^e siècle, représentant les trois quarts du total en 2100... tout comme aujourd'hui. Ceci reflète le maintien de l'appétit de mobilité individuelle couplé à la croissance économique des pays émergents ou "non OCDE".
- Nous avons par ailleurs supposé un ralentissement des croissances des consommations. Ceci résulte de trois phénomènes étroitement liés : le progrès technique, l'intervention supposée croissante des législateurs et des régulateurs dans les performances et les utilisations des véhicules, et l'accroissement des coûts des carburants pétroliers lié au déclin de la production pétrolière mondiale à partir de 2020 environ (ou 2030-2040 si de fortes hausses de prix préalables au pic de la production pétrolière mondiale venaient à repousser et à étaler ce pic).

Nous allons, dans le prochain paragraphe, essayer de montrer que les chiffres retenus sont compatibles avec certaines hypothèses d'évolution des parcs automobiles (VP – voitures particulières – et VU – véhicules utilitaires) mondiaux et des consommations unitaires, prévues en forte diminution.

- Rappelons enfin que notre vision du long terme des productions pétrolières (voir illustration n° 1) est celle d'un début de déclin vers 2020, ou plutôt lorsque productions cumulées auront atteint 1500 Gbbl (contre 800 milliards de barils cumulés en 2000). Dans une telle vision, la question centrale sera celle des sources d'énergies capables d'assurer les 3.4 Gtep en 2050 et les quelques 4 Gtep vers 2100 nécessaires aux besoins du secteur des transports, tels que nous les avons imaginés à ces horizons (voir illustration n° 5).

Démographie, Economie et Energie: 1960 → 2100

	1960	1980	2000	2020	2050	2100
▪ Population Mondiale Ghab	3.0	4.5	6.0	7.5	8.0	10.0
▪ PIB Mondial (Base PPA) 10 ¹² \$ 1990	8.0	20	35	70	150	300
▪ Consommation d'énergies commerciales (Gtep)	3.8	6.4	9.5	14.0	18.0	23.0
▪ PNB/Tête (en \$/90)	2670	4.440	5830	9.330	18.750	30 000
▪ Energie/Tête (en Tep/hab)	1.3	1.4	1.6	1.9	2.3	2.3
Nombre de TEP consommées par 1000 \$ 1990 de PIB mondial	0.47	0.32	0.27	0.20	0.12	0.08
Nombre de \$ 1990 de PIB mondial pour chaque Tep consommée.	2100	3125	3680	5.000	8330	10.000

Passé: Statistiques « valeurs arrondies »

Futur: Estimations de l'auteur

Illustration n° 4

Les consommations énergétiques du secteur des transports 1980 → 2100

Consommations mondiales en milliards de Tep	1980	2000	2020	2050	2100
Transports terrestres	0.9	1.5	2.5	2.0	3.0
Transports aériens	0.1	0.2	0.5	0.4	0.6
Transports maritimes	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3
Transports autres	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2
TOTAL	1.2	1.9	3.2	2.7	4.1

Sources :

← AIE → Auteur →

Illustration n° 5

L'hypothèse économique sous-jacente est celle d'un important changement du niveau des prix de l'ensemble des énergies, lié à la question du pic, puis du déclin de la production pétrolière mondiale. Le pétrole joue en effet depuis plus de cinquante ans le rôle de prix directeur de l'ensemble des énergies, et son prix a été multiplié en gros par quatre en termes réels depuis les années 1970, du fait des chocs pétroliers de 1973 à 1979, malgré le ou les contre-chocs (prix 1998-2003 de 25\$ par baril comparés à ceux de 1968-1972 de 6\$ par baril en monnaie réelle, c'est-à-dire en dollars constants de l'année 2000). Cette première et forte hausse en termes réels a cassé le rythme de la croissance de la demande pétrolière (en gros de 6 % par an entre 1950 et 1973 à 1,5 % par an depuis : voir illustration n° 1). Un second choc sera nécessaire, quelque part entre aujourd'hui et 2020, amenant à s'adapter à l'arrêt de toute croissance de la production d'hydrocarbures liquides naturels. Ce choc aura plusieurs conséquences :

1. Il permettra de développer à grande échelle les économies de consommation d'énergies sous toutes leurs formes.
2. Il permettra de développer au maximum de leur potentiel les énergies renouvelables.
3. il permettra une forte réduction des consommations unitaire des automobiles
4. il stimulera la production à grande échelle d'hydrocarbures liquides de synthèse.
5. il stimulera la production d'hydrogène à des coûts compétitifs à partir du nucléaire ou des énergies renouvelables,
6. Et il stimulera enfin un redémarrage à grande échelle de l'énergie nucléaire au plan mondial, avec de nouvelles filières (voir génération IV à partir de 2020 environ.

L'ampleur du choc nécessaire telle qu'estimée par l'auteur est du même ordre

d'importance que celle du choc des années 1970, c'est-à-dire de l'ordre d'un nouveau quadruplement du prix du brut (passage d'une époque 1998-2003 à 25\$/bbl à une époque 2015-2025 à 100\$/bbl en dollars constants 2000).

La façon dont ce second choc pourrait survenir n'a pas grande importance. Pour prendre une image géologique, on pourrait dire que nous sommes en face d'un problème de tectonique : les évolutions à venir doivent faire cesser l'accumulation des contraintes. En tectonique, ceci peut se faire par un décrochement brutal d'une faille majeure ou par le jeu de failles multiples de faibles rejets individuels. De même le rééquilibrage de l'ensemble du système énergétique mondial peut se faire par un événement brutal sur le prix du pétrole brut comme en 1973 (même si celui-ci fut suivi de diverses secousses secondaires), ou par une série d'ajustements successifs.

Une fois ce rééquilibrage réalisé, on peut s'interroger quant au relais du rôle joué par le pétrole en matière de prix directeur de l'ensemble des autres énergies. Nous pensons que ce sera le pétrole qui jouera ce rôle, pendant longtemps encore, mais lui-même verra son prix très fortement lié aux coûts des diverses formes d'hydrocarbures liquides de synthèse, qui joueront donc dans le système un rôle de « prix directeurs invisibles ».

Dans ce nouveau contexte, une régulation politique des prix (par l'OPEC ou d'autres acteurs) ne sera plus nécessaire.

Cette nouvelle situation ne sera pas dépourvue de risques. Par exemple, en ce qui concerne les biocarburants, les nouveaux niveaux de prix des énergies risquent de rendre la « concurrence pour les terres arables et pour l'eau » impitoyable, acculant certaines régions à sacrifier leurs

productions de ressources vivrières. De même, cette évolution des prix engendra des tentations de « fuite en avant » en matière de biotechnologies, OGM ou autre, pour accroître les rendements des productions de biomasses à finalité énergétique.

Energie et Transports 2000 → 2100

Energie Monde (en Gtep)	2000	2020	2050	2100
Dont :				
Pétrole	3.7	5.0	3.5	1.5
Gaz	2.1	4.0	4.5	2.0
Charbon	2.2	3.0	4.5	4.5
Nucléaire	0.6	1.0	4.0	12.0
Renouvelables	0.7	1.0	1.5	3.0
Consommation totale d'énergie (Gtep)	9.5	14.0	18.0	23.0
Dont :				
Energies consommées pour les transports - Gtep	1.9	2.7	3.4	4.1
Pourcentage des consommations énergétiques assurant les besoins des transports	20%	19%	19%	18%

Source : Passé : Statistiques AIE arrondies - Futur : Estimations de l'auteur

Illustration n° 6

Nota : la quasi constance et même le léger déclin de la part de l'énergie mondiale consommée par le secteur des transports (20 % en 2000 versus 18 % en 2100) est contraire à certaines prévisions qui voient la part des transports augmenter fortement (jusqu'à 50 % et plus !).

Le parc automobile mondial 2000 → 2100

Parc automobile mondial (milliers de véhicules)	2000	2020	2050	2100
VP	500	900	1 200	2 000
VU	350	400	500	700
TOTAL	850	1 300	1 700	2 700
VP part OCDE	75%	66%	50%	33%
VU part OCDE	50%	45%	40%	30%

Source pour les prévisions : auteur

Illustration n° 7

* Dans ce tableau on suppose la « géographie » de l'OCDE figée dans sa configuration en l'an 2000.

Ce tableau n'est pas le résultat d'une étude (qui devrait incorporer l'évolution des modes de transports collectifs, de l'urbanisation, des kilométrages annuels parcourus, etc.). Il n'est qu'une estimation fournie pour permettre de vérifier une cohérence d'ensemble des chiffres avancés par l'auteur en matière de consommations d'énergies du secteur des transports.

Bilans énergétiques des transports routiers: valeurs des consommations relatives 2000 → 2050

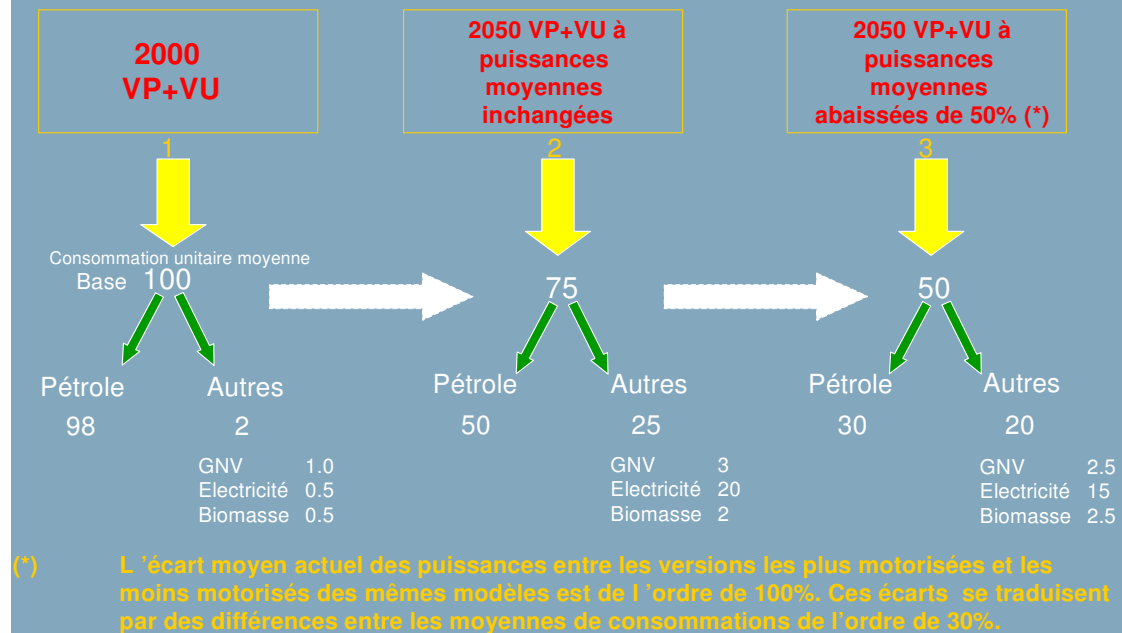


Illustration n° 8

Écarts de puissance pour un même modèle automobile (Août 2002)

Marque	Modèle	Modèle le moins puissant	Modèle le plus puissant
		60 CV	172 CV
Renault	Clio	60 CV	172 CV
	Vel Satis	165 CV	245 CV
PSA	Peugeot 206	60 CV	137 CV
	Peugeot 307	75 CV	138 CV
	Peugeot 607	160 CV	210 CV
Citroën	Citroën C3	60 CV	110 CV
	Citroën Xsara	75 CV	167 CV
	Citroën C5	117 CV	210 CV
Ford	Fiesta	68 CV	100 CV
	Focus	75 CV	170 CV
Volkswagen	Polo	55 CV	100 CV
	Lupo	60 CV	125 CV
	Golf	75 CV	204 CV
Honda	Civic	90 CV	200 CV
Fiat	Punto	90 CV	130 CV
Toyota	Corolla	97 CV	192 CV

Un écart moyen de puissances du simple au double pour les mêmes modèles. Des écarts de consommation de l'ordre de 30%.

Illustration n° 9

Quelles sources d'énergies pour les transports en 2050 et 2100 ?

Les contraintes physiques sur les ressources en hydrocarbures liquides et gazeux et les contraintes d'émissions de gaz à effet de serre, tant pour les hydrocarbures que pour le charbon, paraissent conduire à une forte réduction du rôle relatif des énergies fossiles au plan mondial au cours du XXI^e siècle. L'illustration n° 6 résume ce second "cadre" dans lequel doit s'inscrire notre réflexion sur la problématique à long terme de la satisfaction en énergie des besoins de transports.

Une question s'impose lorsque l'on considère la fin du XXI^e siècle : la production pétrolière mondiale serait, selon nous, de l'ordre de 1,5 Gtep par an à l'horizon 2100, alors que les seuls transports nécessiteront environ 4 Gtep d'énergie. Il ne peut donc être question d'une simple continuité des sources d'énergies actuelles, avec en particulier l'ensemble du secteur des transports reposant à plus de 95 % sur le pétrole. Il n'y a aucun problème à extrapoler jusqu'en 2020 les modes de transports actuels et les consommations d'énergies qui leur sont liées. Mais dès avant 2050 on voit se dessiner un basculement : à cette date, on disposerait d'une production pétrolière mondiale de 3.5 Gtep (du même ordre de grandeur que la production actuelle) alors que les seuls transports en demanderaient presque autant. Il est clair que le pétrole ne peut être réservé à 100 % de sa production aux seuls transports : Du fait de sa valeur économique en tant que matière première (pétrochimie, solvants, cires et paraffines, bitumes, etc.), ou en tant que source d'énergie calorifique pour les consommateurs isolés (usines, plantations, habitations, etc.) le secteur des transports ne devrait pouvoir compter au mieux que sur environ 60 % de la production totale à l'horizon 2050, soient quelques 2.5 Gtep et un pourcentage logiquement moindre au delà. Nous supposons, ce qui est

probablement optimiste, que les hydrocarbures naturels pourraient encore fournir 1 Gtep d'énergie au secteur des transports à l'horizon 2100. Déjà en 2050, un "déficit" de 1 Gtep pour le secteur des transports serait donc à combler par d'autres sources d'énergies, sachant que nous avons déjà intégré dans nos prévisions un fort impact du progrès technique et des législations visant aux réductions des consommations des véhicules. Cet impact représente dans nos hypothèses une diminution de 50 % des consommations unitaires moyennes sur les parcs VP + VU entre 2000 et 2050. (voir illustrations n° 7, 8 et 9).

Le problème est donc, en gros, de savoir quelles énergies pourraient fournir au secteur des transports les 1 Gtep manquants en 2050 et les 3 Gtep manquants en 2100 que les productions d'hydrocarbures liquides naturels ne pourraient pas satisfaire.

Il existe deux types possibles de réponses à cette question, qui d'ailleurs pourraient se combiner.

La première réponse possible est la production d'hydrocarbures de synthèse (ou composés chimiques carburants équivalents : alcools, esters, etc.) pour suppléer les déficits. La seconde réponse possible est l'introduction massive de nouvelles sources ou vecteurs d'énergie dans le secteur des transports, l'hydrogène et l'électricité faisant a priori figure de favoris ... Rappelons que leur utilisation dans le domaine des transports terrestres a été envisagée (pour l'hydrogène) ou mise en œuvre (pour l'électricité) depuis plus d'un siècle (voir illustration n° 2).

■ Les hydrocarbures de synthèse

Ceux-ci se rangent en trois familles, dont deux ont déjà une longue histoire : ceux produits à partir de biomasse (éthanol, méthanol, huiles végétales, EMC, ETBE, etc.) et ceux produits à partir d'autres énergies fossiles, filières GTL (gas to liquids) ou CTL (coal to liquids), variantes du procédé Fischer Tropsch ou par l'hydrogénation directe (variantes du procédé Bergius). Ces deux premières familles de procédés sont bien connues et leur potentiel régulièrement réévalué. Cependant, tant les carburants ex-biomasse que ceux obtenus par synthèse Fischer Tropsch semblent devoir connaître des limitations quant à leur potentiel quantitatif. Compte tenu des ordres de grandeur en cause, ces hydrocarbures synthétiques que nous savons déjà produire nous permettraient peut-être de résoudre la question posée jusque vers 2050, mais très probablement pas à un horizon plus lointain. En revanche, nous n'évoquerons pas les recherches portant sur des filières de production d'hydrocarbures liquides synthétiques par des voies plus exotiques, dont les probabilités de succès au plan économique restent actuellement très faibles (polymérisation ou « homologation » du méthane, bioprocédés à partir de cultures de divers unicellulaires ou autres). Nous n'évoquerons qu'une seule filière « exotique » car elle nous semble avoir un réel potentiel : celle de la production d'hydrocarbures à partir d'hydrogène produit soit à partir d'énergies renouvelables, soit plus probablement à partir d'énergie nucléaire. C'est ce que l'on pourrait appeler la « carbonisation de l'hydrogène ».

Les limitations sont de nature différente pour les biocarburants et pour les carburants Fischer Tropsch. Pour les biocarburants, c'est une question de coût croissant avec les besoins d'une part, et d'autre part, de besoins croissants en terres arables et en eau (cette dernière étant elle-même produite à l'avenir avec un contenu énergétique

croissant : pompages de plus en plus profonds, dessalement à grande échelle, etc.).

Rappelons que le rendement net des biocarburants est au mieux de l'ordre de 1 tep/ha/an, qu'il s'agisse des filières alcools ou des filières oléagineux... et probablement du même ordre demain pour les futures filières ligno-cellulosiques. La « concurrence pour la terre » limitera donc le développement des biocarburants à environ 10 % de nos besoins sur 2050 – 2100, utilisant quelques 15 % des terres arables ou forestières. Même une "révolution OGM" ne semble pas pouvoir faire sauter ces verrous limitatifs, permettant seulement d'en reculer les niveaux et donc les dates d'apparition.

Pour les carburants ex-synthèse Fischer Tropsch, les limitations sont aussi économiques, mais liées au coût futur, logiquement croissant, d'une part des émissions de CO₂, et d'autre part des coûts également croissants de leurs matières premières (gaz ou charbon). Ces procédés sont, en effet, et resteront "énergivores". Cette contrainte ne sera peut-être pas encore majeure en 2020 mais le deviendra au-delà, bien avant 2050, date approximative à laquelle, par contrainte sur les ressources, il faudrait passer du GTL au CTL. Le recours massif au GTL ou au CTL pour produire des carburants de synthèse supposerait que nous ayons su résoudre à un coût raisonnable la question de la séquestration du CO₂ émis dans les usines de production de ces carburants.

Nous avons dit qu'il y avait trois familles possibles d'hydrocarbures de synthèse, en ayant seulement évoqué la troisième, qu'on pourrait appeler « l'hydrogène carboné ». Il s'agirait de produire de l'hydrogène à partir d'énergies renouvelables ou nucléaires, et de le "carboner" à la source afin d'éviter toute la coûteuse logistique du transport massif de l'hydrogène, de sa distribution et de son stockage à bord des véhicules.

Ce concept de la "carbonisation de l'hydrogène" ne semble pas avoir été réellement exploré au cours du dernier demi-siècle, mais il est théoriquement séduisant. On peut mettre en œuvre ce concept par une voie analogue au Fischer Tropsch : on produirait de l'oxyde de carbone (par oxydation partielle de charbon ou de biomasses), qu'on combinerait avec de l'hydrogène très probablement d'origine « nucléaire ». On peut penser qu'il existera des mises en œuvre plus efficaces au plan économique, par hydrogénation directe de substances carbonées (successeurs des procédés Bergius développés en Allemagne en parallèle du procédé Fischer Tropsch dans le contexte de préparation à la seconde guerre mondiale).

Naturellement, l'idéal serait de pouvoir utiliser du CO₂ comme source de carbone, combinant alors séquestration du CO₂ et carbonisation de l'hydrogène.

Au total si les carburants de synthèse "classiques" ou nouveaux, comme l'hydrogène carboné, venaient à buter sur des limitations technico-économiques, il nous reste à évoquer les grands challengers possibles que sont l'hydrogène d'une part et l'électricité d'autre part.

▪ L'hydrogène

Une vaste littérature nous rappelle depuis 1875 (Jules Verne, *l'Île mystérieuse*) que l'hydrogène est le carburant de demain, car il est inépuisable et idéalement propre puisque sa combustion ne produit que de l'eau.

Combien d'articles, de livres, de séminaires sur ce thème : un article des années 1930 mettait les Français en garde contre la future armée allemande qui serait dotée de camions à hydrogène ! Les publicités actuelles de certains groupes industriels de premier plan n'hésitent pas à affirmer un avenir radieux au plus léger des atomes dans le secteur des transports.

Une première constatation s'impose lorsque l'on parcourt la littérature relative à l'hydrogène : la relative discrétion quant à sa production, qui est le vrai problème, au profit de longs développements sur son stockage et son utilisation dans les moteurs, turbines, ou piles à combustibles. Ces développements soulignent le caractère propre des véhicules à hydrogène, n'émettant localement que de l'eau, mais négligeant généralement les aspects économiques et les émissions de CO₂, en amont des cycles hydrogène.

L'hydrogène n'est pas en effet une source d'énergie mais un vecteur énergétique, et pour le produire, il faut d'abord utiliser d'autres énergies. Après avoir été produit par électrolyse au début du siècle, l'hydrogène est actuellement produit à 98 % à partir d'hydrocarbures ou de charbon, avec un coût de production allant de deux à cinq fois celui des hydrocarbures utilisés pour le produire. Ce rapport est de l'ordre de deux lorsqu'on part d'hydrocarbures "chers" – reformage de gaz naturel ou de naphta en Europe par exemple – et de l'ordre de cinq lorsqu'on part d'hydrocarbures "bon marché" – gaz naturel dans un pays producteur exportateur ou résidu lourd de raffinerie alimentant une unité d'oxydation partielle (POx) en Europe ou aux USA –. Ceci est illustré par les schémas 10 et 11. Si la raison pour recourir à l'hydrogène dans les

transports est la raréfaction des hydrocarbures et l'accroissement corrélatif de leur coût, cette méthode d'obtention ne peut donc apporter une réponse durable au problème posé. De même le recours au charbon pour produire massivement de l'hydrogène sera en fait limité par les coûts qui seront liés à l'émission du CO₂ ou à sa ségrégation.

Restent les autres méthodes possibles de production d'hydrogène. Si théoriquement la production d'hydrogène par des procédés biologiques (bactéries, algues) est possible, on est actuellement loin de disposer de procédés potentiellement économiques. L'écart actuel varie d'un facteur 100 à 1000 selon les études ou les procédés envisagés. En revanche, la production d'hydrogène par électrolyse (comme au début du XX^e siècle) ou par la décomposition thermique de l'eau via des cycles thermo-chimiques plus ou moins complexes, est moins éloignée du seuil économique.

Ainsi, en Europe ou aux USA actuellement, avec du courant électrique à 20 ou 25 €/MWH, le coût de l'hydrogène obtenu à grande échelle par électrolyse serait de deux à trois fois celui de la production d'hydrogène par reformage ou oxydation partielle. Si on envisageait un recours massif aux voies électrolyse ou cycles thermo-chimiques, cela revient à dire que, pour produire massivement de l'hydrogène, il nous faudra disposer massivement d'électricité ou de calories bon marché non émettrices de CO₂. Sauf percées inattendues du côté des énergies renouvelables, c'est donc le nucléaire qui devrait fournir l'hydrogène nécessaire à long terme pour assurer les transports de demain (de même que l'hydrogène qui serait éventuellement utilisé directement comme vecteur énergétique).

Supposons ce problème clef de la production de l'hydrogène résolu. Il convient alors de s'interroger si cet hydrogène constitue un bon ou un mauvais vecteur énergétique pour assurer la fonction transports. Voici notre réponse. Dans notre

hypothèse économique – quadruplement du prix des hydrocarbures – l'hydrogène nucléaire devient compétitif. Mais pour produire l'hydrogène à partir du nucléaire, il faudra développer des réacteurs adaptés à cette fonction : probablement des réacteurs HTR ou autres filières étudiées dans le cadre de la génération IV, combinant bons rendements énergétiques et utilisation efficace des combustibles fissiles.

Cependant l'hydrogène est et restera un très mauvais vecteur énergétique en matière de transports terrestres. Il pourrait par contre être intéressant en matière de transports aériens : cette question sera évoquée plus loin. Ces deux affirmations reposent sur une analyse des fondamentaux technico-économiques de l'hydrogène, dont la caractéristique principale est de présenter une très bonne compacité énergétique par unité de masse, mais une très médiocre compacité énergétique par unité de volume, quelle que soit la forme sous laquelle on assurerait son transport et son stockage.

Pour illustrer la médiocrité de la compacité énergétique volumique de l'hydrogène, seule déterminante pour les transports terrestres, quelques chiffres suffisent. Le transport de l'hydrogène par canalisation coûte et coûtera à l'avenir environ deux fois plus cher que celui du gaz naturel, qui lui-même coûte environ cinq fois plus cher en termes de logistique que celui des hydrocarbures liquides. Il s'agit là de caractéristiques intrinsèques et la thermodynamique ne se modifie pas par le progrès technique. On peut donc dire dès aujourd'hui qu'en 2050 comme en 2100 une logistique hydrogène par canalisations, massives ou capillaires, coûtera environ dix fois plus cher par unité d'énergie transportée qu'une logistique d'hydrocarbures liquides. Ce facteur dix est d'ailleurs un minimum calculé à partir des seules capacités énergétiques des canalisations de transports en oubliant tous les autres facteurs de "surcoûts" liés à la logistique hydrogène : problèmes spécifiques de sécurité et difficulté de le

transporter massivement à terre autrement que sous pression dans des canalisations.

Par ailleurs la mise à bord et le stockage de l'hydrogène dans un véhicule coûtent de l'ordre de cent fois plus cher que ceux d'un carburant classique, essence, gas-oil ou kérosène. Et ceci très probablement restera vrai quels que soient les modes de stockage retenus pour l'hydrogène : réservoirs à très haute pression (400 bars ou même 800 bars), hydrogène liquide cryogénique (à -253°C), hydrogène chimiquement combiné (hydrures) ou adsorbé (nanotubes de carbone par exemple). Dans tous les cas, sauf celui de l'hydrogène liquéfié cryogénique, la difficulté technico-économique est liée à la faible masse d'hydrogène stocké par rapport à la masse du réservoir nécessaire. Par exemple dans le cas de l'hydrogène sous pression, la masse de l'hydrogène stocké dans celui-ci n'est que de l'ordre de 2 ou 3 % de la masse du réservoir dans le cas de réservoirs métalliques, bien qu'elle puisse atteindre la dizaine de pourcents dans le cas de réservoirs composites à 350 ou 700 bars.

De même, dans le cas des hydrures, il ne semble pas que la masse d'hydrogène utilisable puisse dépasser en pratique 2 % à 3 % de la masse constituée par le réservoir avec ses hydrures.

Sa bonne efficacité énergétique exprimée en termes de contenu énergétique par unité de masse se voit en fait totalement neutralisée par le fait que l'hydrogène non liquéfié nécessite un contenant, quelle qu'en soit la forme, dont la masse est de l'ordre de vingt fois celle de l'hydrogène contenu (voir illustration n° 12)

En ce qui concerne la solution de l'hydrogène liquéfié cryogénique, les limitations sont plus liées au volume du réservoir qu'à sa masse. Elles sont également liées au nécessaire « *boil off* » (évaporation du liquide cryogénique nécessaire pour produire les frigories permettant de la maintenir à température constante) et à l'importante consommation d'énergie nécessaire à la liquéfaction de

l'hydrogène (de l'ordre de 25 à 30 % de la charge).

Une émission d'hydrogène, même faible, n'est évidemment pas tolérable pour des voitures particulières, qui doivent pouvoir être laissées dans des garages ou parkings pour des durées indéterminées.

L'annonce, par un constructeur automobile, au Congrès Mondial du Pétrole de Rio de Janeiro en septembre 2002, de la mise au point d'un réservoir cryogénique embarqué sur automobile avec "zéro boil off" constituerait une percée majeure. On conçoit cependant mal sur quels principes physiques un « zéro boil off » véritable pourrait reposer.

Au total, l'hydrogène apparaît donc bien comme un très médiocre vecteur énergétique en terme de coûts, aux trois stades essentiels de sa mise en œuvre : sa production, sa logistique tant massive que capillaire, et son stockage à bord des véhicules.

La bonne efficacité énergétique de son utilisation dans des piles à combustibles, même si celles-ci étaient bon marché, ne semble pas pouvoir compenser ces handicaps économiques majeurs. Le fait qu'il puisse exister dans le monde des situations exceptionnelles (le cas de l'Islande) où les circonstances locales pourraient justifier au plan économique le recours au vecteur hydrogène ne permettent pas d'infirmes ces conclusions.

Il résulte de ces caractéristiques technico-économiques que l'hydrogène mis à bord des véhicules a fort peu de chances de s'imposer en matière de transports terrestres et devrait rester cantonné à quelques niches restreintes (par exemple flottes urbaines de transports en commun à hydrogène liquide ou à haute pression). Ces niches seraient en gros les mêmes que celles des véhicules "tout électrique" à accumulateurs. Malgré la quarantaine de « stations service » à hydrogène en activité ou en projet fermes existant actuellement (2003), rien ne permet de présager la

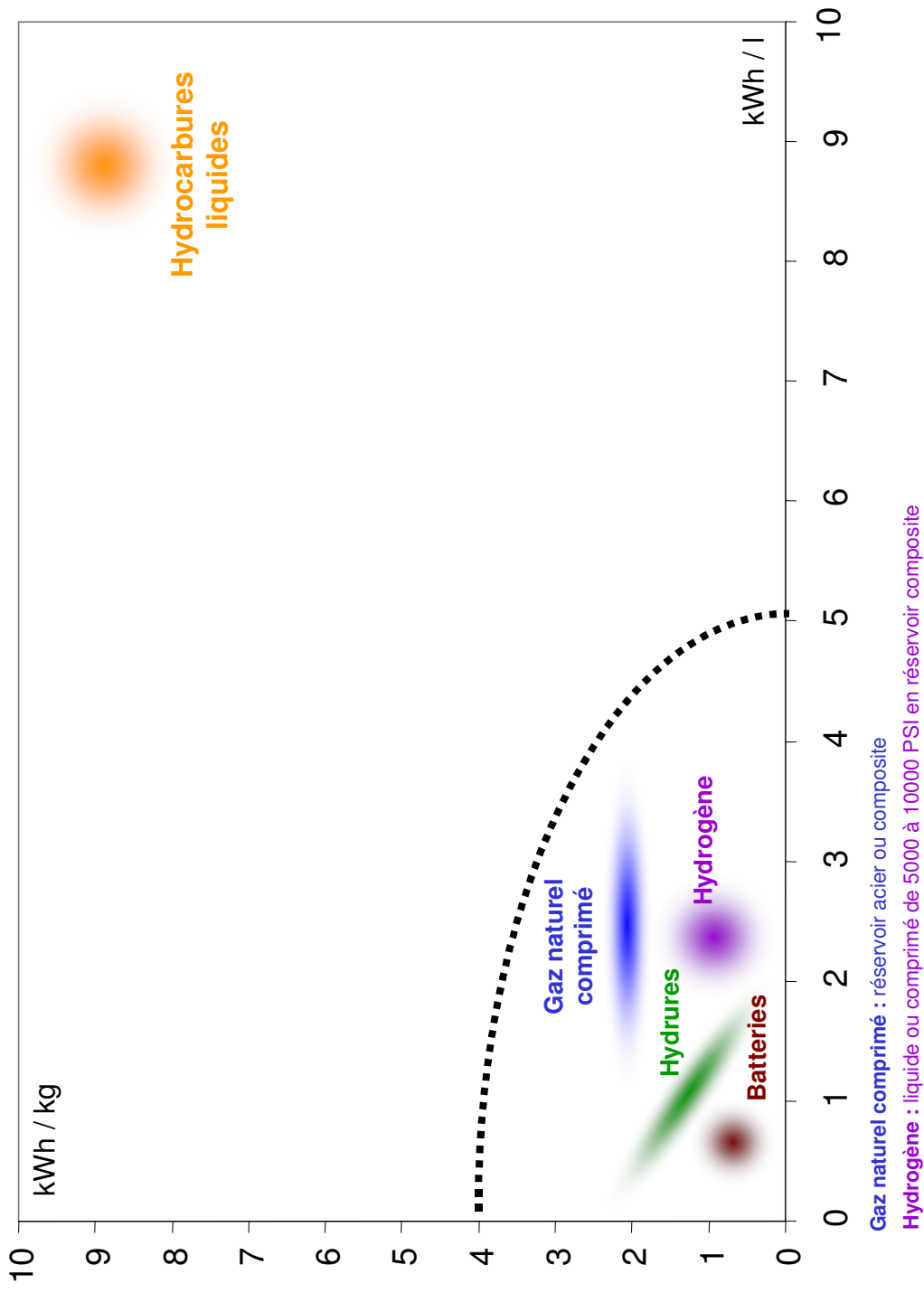
victoire à long terme de l'hydrogène, même à l'intérieur de ces niches d'utilisation.

Par contre, en ce qui concerne les transports aériens, l'hydrogène pourrait un jour bénéficier de son atout de fort contenu énergétique massique : quasi-sans intérêt à terre, cette caractéristique pourrait devenir intéressante pour le transport aérien à très long terme, disons après 2050. Cette idée n'est pas neuve et a déjà donné lieu à nombre de projets et même d'essais (Bombardier B57 modifié en 1957, Tupolev 154 modifié rebaptisé 155 en 1988, etc.).

Pour des avions, le problème de l'encombrement volumique demanderait de consacrer 20 ou 30 % du volume du fuselage aux réservoirs d'hydrogène cryogénique, ce qui ne devrait pas constituer un handicap insurmontable.

En fait, la question de l'utilisation éventuelle de l'hydrogène (sous sa seule version liquéfiée par cryogénie) dans l'aviation mériterait une étude spécifique : nous avons vu que la question du « boil off » excluait une pénétration massive de l'hydrogène liquéfié dans les transports terrestres, alors que ce n'est pas un obstacle majeur pour les transports aériens par gros porteurs. Par ailleurs, le gain de poids a une grande valeur économique pour les transports aériens mais pas pour les transports terrestres. Au total, un bilan H₂ liquéfié versus carburants de synthèse reste à faire pour l'aviation, mais l'hydrogène devrait y montrer des avantages nettement plus marqués pour l'aviation que pour les transports terrestres. Ceci n'exclut cependant pas que d'autres facteurs, comme l'émission d'oxydes d'azote par les turbines à hydrogène, pourraient venir entraver le développement pratique de ce concept.

LES HYDROCARBURES LIQUIDES : UNE COMPACITÉ ÉNERGÉTIQUE INÉGALÉE



▪ L'électricité

Là aussi, comme pour l'hydrogène, l'obstacle depuis plus d'un siècle reste le même : comment stocker une grande quantité d'électricité dans un véhicule (voir illustration n° 12) et le temps nécessaire à sa « mise en stock ».

On notera ainsi qu'en 70 ans le poids des accumulateurs au plomb par kWh stocké, utilisés dans les bennes à ordures SITA n'a pratiquement pas changé : les progrès ont porté sur leur temps de recharge (divisé par deux), leur durée de vie (doublée) et leur compacité volumique (presque doublée).

L'illustration n° 12 permet de comparer les performances des différents types d'énergie en matière de stockage à bord des véhicules automobiles : la suprématie des hydrocarbures liquides y apparaît de façon éclatante.

Nous ne réalisons pas en faisant le plein du réservoir de notre voiture qu'elle fonctionne à l'essence ou au gas-oil que nous remplissons celui-ci au rythme de 100 à 200 km d'autonomie par minute, alors qu'un véhicule électrique ne recharge ses batteries qu'au rythme d'1 ou 2 km d'autonomie par minute de charge. Mais surtout le réservoir d'une automobile moyenne assure une autonomie de plus de 500 km (on va vers les 1000 km), tandis que les batteries de la même automobile moyenne lui assurent une autonomie réelle d'une centaine de kilomètres, soit à peine mieux qu'il y a un siècle, pour des véhicules de poids comparables.

L'histoire des accumulateurs électriques est celle de progrès très lents tout au long du XX^e siècle. De plus, ces progrès passent par le recours à l'utilisation de métaux chers (cadmium, lithium), et polluants, si on ne collecte pas soigneusement les batteries. Ceci ne peut permettre un développement massif à l'échelle des marchés automobiles : la technologie de production des batteries au lithium et de leur chargement est presque aussi sophistiquée que celles de la fabrication et de la mise en œuvre des piles à combustibles.

Sauf rupture technologique brutale et inattendue, les véhicules "tout électrique" resteront donc eux aussi limités à quelques niches : véhicules utilitaires urbains tels que bennes à ordures ménagères, mini-véhicules de loisirs (terrains de golf) ou utilitaires (tracteurs dans les gares), etc. et quelques flottes captives à court rayon d'action, par exemple. Ces niches étant plus ou moins les mêmes que celles de l'hydrogène, liquide ou sous pression, la compétition entre les deux nous dira qui l'emportera pour ces applications très spécifiques.

Cette conclusion pessimiste quant au rôle futur des véhicules électriques doit cependant laisser place à une évolution récente mais qui pourrait jouer un rôle majeur à l'avenir : l'avènement des véhicules hybrides. L'idée, nous l'avons vu, n'est pas neuve, mais les progrès de l'électronique de puissance, des régulations automatiques complexes et la mise au point des transmissions et des différentiels électriques l'ont rendue industriellement possible, à des coûts certes élevés mais non prohibitifs. Depuis 1997, la Toyota Prius est commercialisée et on peut s'attendre d'ici quelques années à pouvoir disposer d'hybrides qui seraient dotés d'assez de capacités d'accumulateurs pour que ceux-ci soient rechargeables sur le réseau. Cela permettrait que le tiers ou la moitié des consommations énergétiques, pour les véhicules utilisés essentiellement en zones urbaines et périurbaines, soient prélevés sur les réseaux électriques. Or, ces modes d'utilisation concernent désormais la majeure partie du parc mondial et leur proportion ne cesse de croître (phénomène mondial d'urbanisation et de développement des banlieues).

Pour atteindre de tels objectifs, il suffirait de disposer de voitures hybrides ayant une autonomie électrique de quelques trente à cinquante kilomètres, ce qui ne devrait pas être hors d'atteinte d'ici 2010 ou 2020. Bien entendu l'essentiel de ces recharges de batteries s'effectuerait de nuit grâce à une tarification adaptée, permettant aux

producteurs d'électricité de réaliser leur vieux rêve : comment lisser les variations des courbes des demandes journalières ? Dans ce schéma, le lissage se ferait en stockant l'électricité produite aux heures creuses de la demande dans les batteries des automobiles au repos.

On notera que dans un pays comme la France, dont la capacité électrique installée est de l'ordre de 100 GWatts (c'est-à-dire l'équivalent de 100 tranches de 1000 MW), la « capacité installée » sous les capots du parc automobile de voitures particulières est de l'ordre de 2000 GWatts (30 millions de voitures à 100 CV ou 73 KWatts en moyenne). Le parc automobile représente donc vingt fois la puissance du parc électrique, mais il ne « tourne » en moyenne que moins de 5 % du temps annuel alors que le parc électrique « tourne » environ 50 % du temps. Voilà qui, en matière de lissage des courbes de demande électriques, serait nettement plus efficace que les quelques centrales hydroélectriques de pompage dont on peut disposer.

Dans la perspective qui est la nôtre d'un fort redémarrage de l'industrie électronucléaire après 2020 au plan mondial, on conçoit bien la remarquable complémentarité qu'apporterait le développement massif des véhicules hybrides rechargeables.

La mondialisation de telles solutions hybrides, pour l'essentiel des véhicules automobiles à usage urbain, périurbain ou simplement utilisés principalement pour parcourir de courtes distances, permet d'envisager que le tiers ou le quart du bilan des consommations énergétiques du secteur des transports terrestres soit ainsi d'origine électrique, et ceci dès avant 2050 pour les pays type OCDE, et peu après pour l'ensemble des parcs automobiles mondiaux. Cette solution paraît devoir se limiter cependant aux voitures particulières (hors professionnels des longs trajets) et aux véhicules utilitaires spécialisés dans les courts trajets (de 50 à 100 km/jour) à l'exclusion des professionnels grands routiers. Ces véhicules, pour lesquels la

solution « hybrides rechargeables » paraît séduisante, représenteraient d'ici 20 ou 30 ans environ 70 à 80 % du parc mondial et de l'ordre des deux tiers des consommations d'énergie.

Synthèse et conclusions

En matière de transports 2020 c'est demain, et 2050 c'est après demain. Ce secteur est en effet marqué, comme l'ensemble des phénomènes liés à l'énergie, par une grande inertie, et donc une grande lenteur face à des modifications fondamentales.

Ceci est dû d'abord à l'inertie des parcs d'outils de transports : une cinquantaine d'années pour les modèles d'avions et navires, une dizaine d'années pour les véhicules routiers. Mais il y a surtout l'inertie des infrastructures de transports. Les autoroutes, voies ferrées, ports, aéroports que nous construisons aujourd'hui seront encore utilisés dans cinquante ans, et pour une majorité d'entre eux encore d'ici la fin du siècle. Les infrastructures de distribution d'énergie aux divers moyens de transports représentent, elles aussi, de longues chaînes de systèmes logistiques coûteux et à durée de vie longue. Dans la vision du futur que nous avons présentée, elles n'auraient pas besoin d'être modifiées. Ceci constitue un avantage économique considérable par rapport à toute autre solution.

Plus fondamentalement, la vision que nous avons développée correspond à une conviction selon laquelle les avantages des hydrocarbures liquides sont tels aux plans technique et économique (facilité d'emploi, sécurité, haute densité énergétique, faiblesse des coûts) qu'ils resteront imbattables. Même si l'hydrogène ou les véhicules totalement électriques pourront occuper quelques niches, ce sont les véhicules à hydrocarbures liquides – qu'il s'agisse d'hydrocarbures naturels ou de synthèse - plus ou moins hybridés, qui continueraient à remplir 80 ou 90 % des

besoins de transports routiers au plan mondial sur le siècle à venir.

L'inconvénient théorique majeur de cette vision est celui de l'impossibilité de séquestrer les émissions de CO₂ au niveau des véhicules. Mais une évolution des origines des carburants du type de celle que nous avons envisagée permettrait une réduction progressive effective de ces émissions. La concentration progressive des émissions de gaz carbonique au profit du secteur des transports a une logique forte : c'est dans ce secteur que les émissions de CO₂ ont la plus forte valeur économique. Dit autrement, ce sont les transports qui pourraient payer les prix d'émission les plus élevés, comme ils supportent aujourd'hui les taxations les plus élevées dans les pays développés sans que cela entrave réellement le développement des transports automobiles.

Par ailleurs, si les coûts d'émission du carbone devenaient prohibitifs, la "carbonisation" d'hydrogène essentiellement nucléaire à partir de biomasse pourrait offrir une solution à évaluer (besoins en biomasse probablement assez inférieurs à ceux requis par sa conversion directe en biocarburants par tep de carburant produite). Cette solution trouve sa logique, d'une part dans le fait que le gaz de synthèse ex biomasse est structurellement pauvre en hydrogène (une partie de celui-ci se combinant à l'oxygène de la biomasse), d'autre part dans le fait qu'il devrait exister à l'avenir de fortes contraintes économiques à utiliser pour la production du gaz de synthèse une source de carbone non émettrice de CO₂ en termes de bilans globaux.

Dans l'évolution que nous avons envisagée, les carburants et les motorisations continueront d'évoluer, comme elles l'ont fait au cours des dernières décennies. Ainsi dès 2020 ou 2030 les carburants automobiles essence et diesel pourraient converger en réponse à l'éventuelle convergence des motorisations à allumage commandé et de celles fonctionnant par auto-allumage. Ces

carburants du futur auront éventuellement des compositions moléculaires prédéfinies, ou pourraient même peut-être devenir "monomolécules".

Au cas où cette dernière solution s'imposerait, la logique serait d'utiliser l'hydrocarbure le moins carboné, ou le plus riche en hydrogène, qui soit un liquide stable aux conditions ordinaires de température et de pression et qui corresponde aux besoins des motorisations du moment. Ces objectifs poseront naturellement certains problèmes d'élaboration des carburants, aussi bien pour les différents types de carburants de synthèse que pour ceux qui seraient encore issus des hydrocarbures liquides naturels : l'industrie du raffinage deviendrait alors une véritable industrie de synthèse, très proche de la pétrochimie.

En ce qui concerne les carburants de synthèse proprement dits, leur importance relative serait amenée à évoluer au cours du temps.

Ainsi dans un premier temps, disons la première moitié du XXI^e siècle, ce seraient les biocarburants et les carburants Fischer-Tropsch à partir du gaz naturel ou du charbon qui auraient le rôle dominant en matière de source de carburants de synthèse. Puis ce serait au tour de l'"hydrogène nucléaire carboné à la source", variante écologique du procédé Fischer-Tropsch, de prendre progressivement le relais et de devenir la source dominante des carburants de synthèse au-delà de 2050.

Enfin l'électricité, grâce à une hybridation de la majorité des véhicules sous forme d'hybrides rechargeables, deviendrait, elle aussi, une source d'énergie majeure pour les transports terrestres (hybridation d'une quasi totalité des VP et d'une partie des VU, ceux spécialisés dans les trafics à faibles distances).

Les parts respectives de ces diverses sources d'énergies seront, à chaque époque, déterminées par l'évolution de leurs coûts respectifs, y compris les coûts liés à leurs émissions en matière de gaz à effet de

serre ou tous autres coûts qui seraient liés à des décisions politiques.

Arrivés à ce stade de notre analyse, il est tentant d'essayer de chiffrer l'importance relative des diverses sources d'énergie qui se combineraient à l'horizon de la fin du XXI^e siècle pour assurer la fonction de mobilité terrestre. C'est bien évidemment un exercice illusoire, tant il y a de paramètres qui pourraient évoluer à l'avenir et déplacer le curseur des grands équilibres technico-économiques : combien d'hydrocarbures liquides naturels réellement disponibles vers 2100 ? Quels coûts à long terme pour les émissions de carbone ? Quels coûts à long terme pour les déchets nucléaires ? Quels coûts pour la production massive de biomasse ? Quels progrès techniques non imaginables aujourd'hui ?

Malgré son caractère illusoire, cet exercice est salutaire, car il permet d'illustrer qu'un développement durable des transports reposant essentiellement sur les hydrocarbures liquides est possible au cours du siècle à venir, malgré le déclin prévisible de la production pétrolière mondiale. Si on accepte que les chiffres n'ont pour seule vertu que de décrire un futur possible, et qu'ils n'ont pas la prétention de constituer une prévision de ce futur, nous proposerions une répartition des énergies utilisées vers la fin du XXI^e siècle par le secteur des transports en quatre quarts plus ou moins égaux :

- (a) un quart de liquides "naturels"
- (b) un quart de synthétiques conventionnels
- (c) un quart d'hydrogène carboné
- (d) un quart d'électricité.

Cette vision est représentée sous forme de deux graphiques par les illustrations n^{os} 13 et 14.

Le graphique 13 montre quelle pourrait être la part de la production pétrolière disponible pour le secteur des transports.

Le graphique 14 indique comment pourraient se combiner les différentes sources d'hydrocarbures synthétiques, ainsi que la pénétration de l'électricité dans le

secteur du transport automobile. Cette prospective simpliste en quatre quarts égaux doit naturellement se lire en ajoutant que pour chacun des quatre types d'énergies considérées, la marge d'erreur doit être de ± 0.5 Gtep/an et peut être même supérieure pour certains.

On notera que les « réserves ultimes » correspondant aux graphiques ci-dessus représenteraient quelques 4000 milliards de barrils (3000 pour les bruts conventionnels et non conventionnels y compris les sables bitumineux – tar sands -) plus 1000 pour les schistes bitumineux – oil shales).

Profil de production mondiale et part des transports

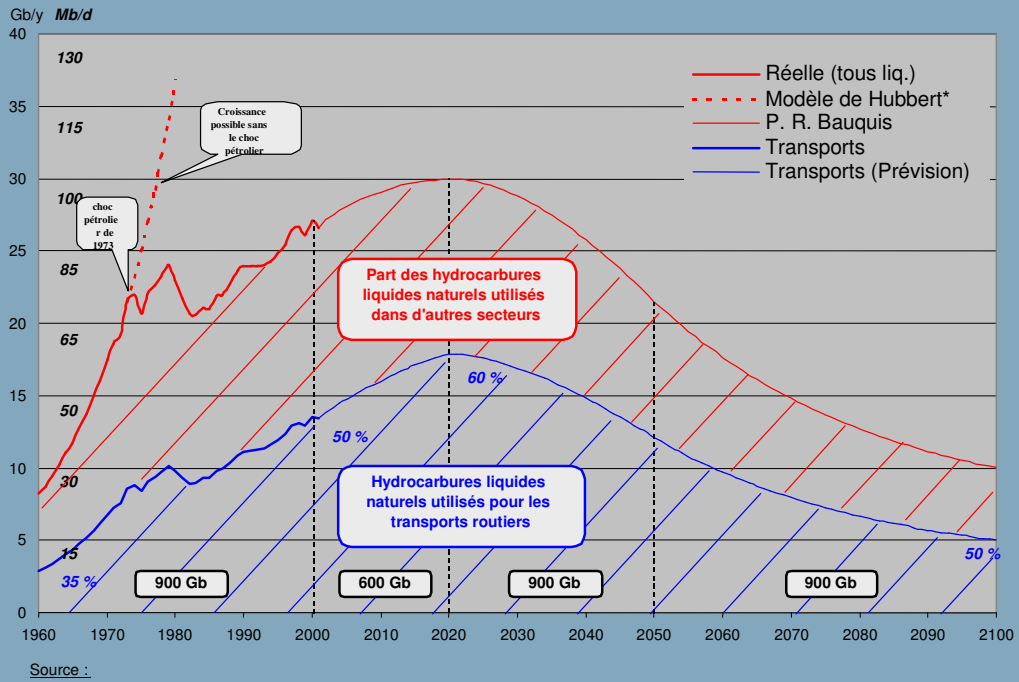


Illustration n° 13

Quelles énergies pour les transports : 1960 - 2000 - 2100

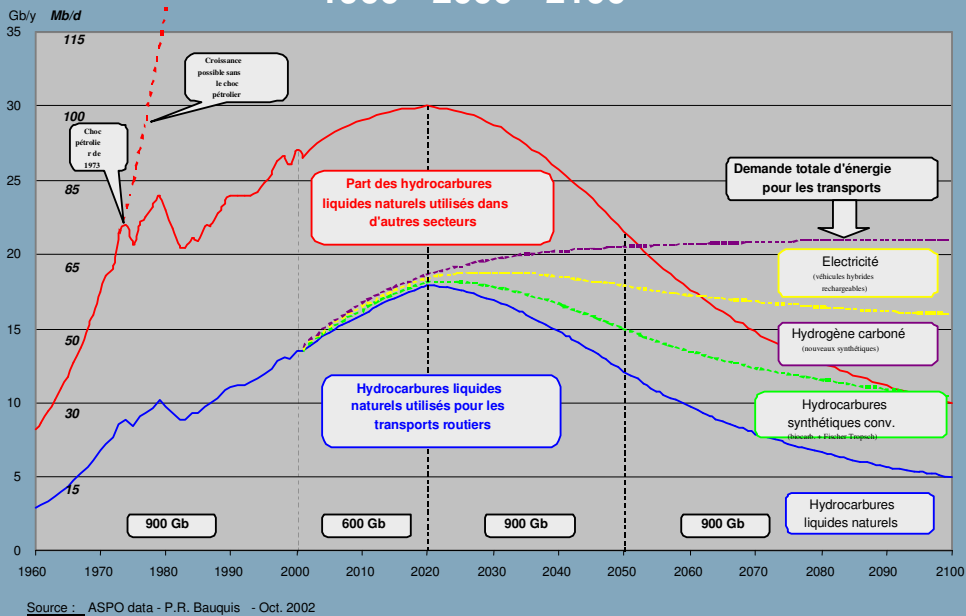


Illustration n° 14

Une autre lecture de cette vision consisterait à dire que 1.5 Gtep/an viendrait des énergies fossiles : la totalité de (a) et la moitié de (b), plus de 1.5 Gtep/an viendrait du nucléaire, la totalité de (d) et plus de la moitié de (c) — tandis que moins de 1 Gtep/an proviendrait des énergies renouvelables, la moitié de (b) et moins de la moitié de (c) sous forme de biomasses.

La vision du long terme des énergies utilisées dans le secteur des transports ressortant de cet article présente un inconvénient que nous avons souligné : l'émission décentralisée, et donc non séquestrable, de gaz carbonique. Nous pensons que ce handicap exprimé en termes économiques resterait très inférieur aux surcoûts inhérents à des visions du type « tout hydrogène » (avec ou sans PAC).

Enfin, l'enchaînement progressif des sources d'hydrocarbures liquides utilisées avec des émissions décroissantes en CO₂, lorsque l'on passe d'un type de synthétiques à l'autre et lorsque se fait la pénétration de l'électricité (grâce aux hybrides rechargeables), permet au total d'obtenir un système durable. En effet, le calcul des émissions globales de CO₂ du système des transports terrestres montre un profil croissant jusque vers 2030-2040, culminant à environ 10 GT de CO₂/an, puis décroissant ensuite pour se stabiliser en dessous de 8G tonnes de CO₂ par an après 2060 (cf illustration n° 18).

L'illustration n° 19 montre ce que serait le profil global des émissions de CO₂ liées à la consommation d'énergie de 2000 à 2100 (en retenant la vision du futur énergétique mondial de l'illustration n° 15) et la part qui serait due aux transports terrestres.

Epilogue

Le lecteur sera peut être surpris de ne pas avoir trouvé un paragraphe consacré aux véhicules à GPL ni aux véhicules à gaz naturel comprimé (CNG), brièvement évoqués dans notre introduction. La raison

est qu'il s'agit là de "niches énergétiques" dont le potentiel de développement restera très limité pour une série de raisons technico-économiques. En particulier pour ce qui est des véhicules à gaz comprimé, on observe, comme pour les véhicules tout électriques, une extrême lenteur de l'évolution technologique et donc de l'évolution des caractéristiques des véhicules. Les réservoirs de gaz comprimé des automobiles Sulzer du début du siècle avaient presque les mêmes caractéristiques (pression, poids, encombrement) que celles des réservoirs de gaz dans les véhicules CNG des années 1980 (ce n'est que récemment que ces réservoirs ont évolué, les réservoirs en matériaux composites à 300 bars ou plus venant remplacer les réservoirs métalliques à 200 bars).

Le lecteur sera peut être encore plus surpris de n'avoir non plus rencontré un développement sur l'avenir des piles à combustibles (PAC), seulement évoquées dans l'introduction.

Cette absence reflète un point de vue selon lequel le succès ou l'échec futur des PAC dans le domaine de l'automobile ne modifie pas en profondeur la problématique des besoins et sources d'énergies à long terme de ce secteur. Les piles à combustibles ne sont que des convertisseurs d'énergie. Les véhicules à piles devront être alimentés, soit en hydrocarbures ou produits apparentés (alcools, esters, etc.) pour produire l'hydrogène à bord des véhicules, soit directement en hydrogène.

Les vrais problèmes sont donc bien ceux que nous avons tenté d'analyser : quelles sources d'énergies pour les véhicules de demain et d'après-demain ?

On voit que la solution durable que nous avons envisagée, durable car elle peut se prolonger bien au-delà de la fin du XXI^e siècle, implique une large symbiose entre deux secteurs de l'énergie aujourd'hui indépendants l'un de l'autre : le secteur de l'industrie des hydrocarbures et le secteur de l'industrie nucléaire.

Voilà la raison pour laquelle nous avons dédié cet exercice de prospective à James Lovelock⁽¹⁾ et à la minorité des écologistes qui, comme lui, pensent qu'il n'est pas de développement durable possible sans un large recours à l'énergie nucléaire.

⁽¹⁾ **Note de l'auteur** : James Lovelock, scientifique britannique de réputation mondiale, fut au cours des années 1960 l'un des pères fondateurs de l'écologie. Il se distingue de la majorité des écologistes par sa position favorable au développement de l'énergie nucléaire.