

# FIN DU PÉTROLE (?) ET ENJEUX ENERGETIQUES<sup>1</sup>

Par M. Armand LATTES

Les énergies fossiles ont été à la base du développement industriel et économique de notre époque et de l'amélioration des conditions de vie pour plusieurs générations. Parmi ces énergies, le pétrole a constitué une ressource extraordinaire : l'héritage que nous a légué la nature atteignant 10 000 à 12 000 milliards de barils, dont seulement 6000 à 7200 milliards étaient extractibles. Si l'on admet que la consommation moyenne est de 4 barils/hb/an — avec de fortes différences suivant les pays : 11 pour la France, 20 pour les USA, et 1,5 consommés en Chine — il est légitime de s'interroger sur « la fin du pétrole ».

A ce jour, 900 milliards de barils ont été utilisés, et l'on estime à 2010, 2020 (ou 2040 ?, les experts n'étant pas forcément d'accord sur ces chiffres) le moment où le plateau de production, appelé pic pétrolier (*peak oil*), a été ou sera atteint. Les réserves doivent être définies en fonction de leur accessibilité ; on distingue :

- les réserves prouvées, extractibles à plus de 90 %, soit : 1000 milliards de barils ;
- les réserves probables, dont la récupération n'atteint que 50 % ;
- les réserves possibles, dont seulement 10 % sont accessibles.

Au total, 65 à 70 % de ces réserves sont la propriété de l'OPEP ! Mais la recherche scientifique et technologique a mis au point des méthodes d'extraction et de valorisation qui permettent d'espérer une production plus large grâce à l'exploitation de ce que l'on appelle « les pétroles haute technologie ». On rassemble sous ces termes : la découverte de nouveaux gisements, les méthodes modernes de Récupération Assistée du Pétrole, les pétroles non conventionnels (bruts lourds, extra lourds, sables asphaltiques, schistes bitumineux). Ainsi, pour la *BP Statistical Review*, les réserves prouvées atteindraient 1200 milliards de barils, soit 41 ans de consommation actuelle. D'autres économistes sont encore plus optimistes : 1750 milliards selon Colin Campbell et même 2274 milliards selon Washington !

---

<sup>1</sup> Communication à l'Académie des Sciences, Inscriptions et Belles-Lettres de Toulouse le 27 mars 2014.

Une autre façon d'aborder ce problème est de s'interroger sur l'économie des ressources, à savoir : calculer les réserves en fonction du prix du baril, sachant que l'exploitation des pétroles haute technologie sera beaucoup plus onéreuse que celle des pétroles conventionnels. Ainsi, en additionnant : le pétrole lourd, le super lourd, celui provenant de la récupération tertiaire, des cercles polaires, des eaux profondes, des schistes bitumineux, on pourrait espérer (?) des réserves de plus de 4000 milliards de barils pour un prix unitaire entre 80 et 100 dollars !

### **Les gisements pétroliers : « des éponges récalcitrantes »**

En dépit d'une opinion encore répandue, le pétrole ne se présente pas sous la forme d'un immense lac souterrain ! Le pétrole étant contenu dans une roche réservoir, ce serait plutôt une éponge incompressible et récalcitrante. Certes la pression interne d'un gisement est suffisante pour faire jaillir le pétrole dans les premiers temps de l'exploitation : c'est ce que les pétroliers appellent « la récupération primaire », mais celle-ci s'arrête d'elle-même très rapidement. Commence alors ce que l'on appelle « la récupération secondaire » où les méthodes utilisées (pompage, injection de gaz, d'eau etc..) ne modifient pas l'état physique des hydrocarbures liquides. Malheureusement ce drainage ne vide pas toute la roche réservoir et le pétrole reste piégé dans des pores et capillaires très étroits. Au total, après ces traitements, c'est 30 à 35 % en moyenne de la totalité du gisement qui sont ainsi valorisés.

Pour terminer l'exploitation on en est arrivé à utiliser des procédés de « récupération tertiaire » qui modifient l'état physique du pétrole au sein des gisements. On distingue ainsi, des méthodes thermiques : injection de vapeur d'eau à haute température ou combustion *in situ*, pour abaisser la viscosité, injection d'eau améliorée par addition de tensioactifs et de polymères, injection de CO<sub>2</sub> soluble dans les hydrocarbures ; la production est ainsi augmentée dans des proportions variables suivant la nature de la roche et du pétrole.

Il faut préciser que ce qui précède ne se déroule pas forcément de cette manière chronologique et que la récupération tertiaire peut parfois être mise en place dès le début de l'exploitation. Parmi les progrès qui ont fait avancer les méthodes d'exploitation, il faut citer aussi le forage horizontal permettant d'éviter la multiplication de forages verticaux. .

A titre d'exemple on peut citer deux cas de gisements offshore particulièrement démonstratifs :

- le champ de Sleipner, dans la mer du Nord à 240 km des côtes norvégiennes ; le gisement se situe à 2500 mètres de profondeur. Le gaz contient une proportion importante de CO<sub>2</sub> qui doit être capté ; pour cela il est séparé des hydrocarbures et injecté dans un aquifère marin, à

1000 mètres sous le plancher océanique. Constitué d'un grès, cet aquifère assurera le stockage du CO<sub>2</sub> pendant des milliers d'années.

- le champ de Dalia, à 135 km de Luanda, la capitale de l'Ouganda : c'est un des plus remarquables exemples de gigantisme en matière de champ pétrolier. Il comporte 71 puits : 31 d'injection d'eau, 3 d'injection de gaz et 37 de production raccordés à 9 collecteurs. Une unité flottante recueille le brut, il s'agit d'une énorme plateforme flottante (un navire) de plus de 300 mètres de long et 60 mètres de large capable de collecter 240 000 barils par jour (la production actuelle) et d'une capacité de stockage de 2 millions de barils. La surface des puits est sous 1200-1500 mètres d'eau. En service depuis décembre 2006, les réserves prouvées et probables atteindraient 1 milliard de barils !

Ces exemples montrent que l'évolution des techniques d'exploitation ont pour objet **de rendre accessible les hydrocarbures « à haut contenu technologique »** :

- soit développer l'exploitation offshore ultra-profond (objectif 3000m), ce qui suppose de maîtriser la veine fluide du fond à la surface par des additifs anti-hydrates et anti-gels de paraffines, et de mettre au point de nouveaux matériaux pour l'allègement des structures ;
- atteindre les réservoirs très enfouis (6000m) avec des matériaux résistants à la corrosion, des fluides de forage et ciments chimiquement stables à haute température et à force ionique élevée ;
- contrôler la viscosité des bruts lourds.

Tout cela afin de repousser les limites et retarder l'apparition du « *peak oil* » où le point maximum de production sera suivi d'une décroissance car, à notre époque, nous consommons quatre fois plus de pétrole que nous en découvrons.

### **Gaz et huiles de schiste**

L'exploitation des gaz et huiles de schiste offre une alternative très intéressante à l'exploitation du pétrole conventionnel : il s'agit de roches, et parfois de sables, imbibés d'hydrocarbures mais dont l'exploitation est difficile en raison des conditions dans lesquelles se trouvent les gisements et de la technique d'extraction, la fracturation hydraulique. Pour récupérer les hydrocarbures, le sol est foré verticalement jusqu'à la couche de schiste, puis horizontalement sur 1 ou 2 km. On injecte de l'eau sous pression avec du sable et des produits chimiques (antibactériens, gélifiants, acides...) pour fracturer la roche. Le sable maintient ouvertes les fractures et permet au gaz ou aux huiles d'affluer vers la surface.

10 à 40 % de l'eau utilisée, soit plusieurs millions de litres, sont récupérés. Le reste traverse les roches jusqu'aux nappes phréatiques qui sont polluées.

De telles ressources seraient présentes dans de nombreux pays, dont la France. Mais, devant les problèmes d'environnement et les protestations des organisations écologiques, le gouvernement français a adopté la loi 2011/835 visant à interdire l'exploration et l'exploitation des mines d'hydrocarbures liquides ou gazeux par fracturation hydraulique. De nouvelles méthodes utilisant le propane à la place de l'eau, moins polluantes, pourraient être autorisées.

### **Le Gaz naturel**

Le gaz naturel est une énergie fossile dont la combustion a l'impact le plus faible sur l'environnement : il représente 23 % de la consommation énergétique globale (40 % pour le pétrole) mais la croissance est de 2,5 % /an. Les réserves mondiales prouvées actuelles représentent 180 000 milliards de m<sup>3</sup>. Un pic gazier est aussi prévu pour 2025 si l'augmentation de la consommation se stabilise à 2 % par an, en 2020 si elle est de 3 % /an.

Remarquons que ces ressources constituent un instrument politique de manipulations et chantages, comme en témoignent les relations entre l'Ukraine et la Russie !

### **Hydrates de gaz : le nouveau pétrole ?**

Le sous-sol de notre planète regorge d'une source d'énergie propre, que l'on sait désormais extraire. Connus des chimistes depuis le XIX<sup>ème</sup> siècle, les hydrates de gaz ressemblent à une glace blanche, ils sont faits de molécules d'eau assemblées en cage — les clathrates — contenant du méthane. Ils sont très abondants et se forment naturellement dans le sous-sol, soit au-delà de 1 000 mètres sous la terre gelée d'un permafrost nordique, soit à plus de 500 mètres au-dessous du plancher des océans. D'énormes quantités de méthane sont ainsi stockées : 1 cm<sup>3</sup> d'hydrate de gaz libère, en fondant, jusqu'à 164 cm<sup>3</sup> de gaz.

Cette ressource abonde dans de nombreuses régions du globe : golfe du Mexique, zone de subduction de Cascadia, au large des Etats-Unis ou fosse de Nankai au Sud Est du Japon. Elle atteindrait deux fois le volume équivalent des réserves prouvées de charbon, de pétrole et de gaz réunis. Par contre l'aspect sûreté de fonctionnement des installations en offshore profond met en évidence un problème de risques géologiques sous-marins liés aux problèmes de stabilité des sols : les sédiments peuvent devenir instables entraînant de grandes avalanches sous-marines, d'où des risques pour les installations de forage et de production sous-marines.

**En conclusion**, les potentialités restantes en gaz naturel devraient permettre de repousser la date du *peak oil*. La production ne devrait pas dépasser les 6 000 Gm<sup>3</sup>/an ; en 2050, elle pourrait être encore supérieure à 4 000Gm<sup>3</sup>/an. Seuls les hydrates de gaz pourraient permettre de satisfaire les demandes au-delà de 2050 et de dépasser les 6 000Gm<sup>3</sup>/an.

En conséquence, le gaz pourra constituer un substitut au pétrole jusqu'en 2035 environ, et au-delà de 2050 avec les hydrates de gaz si, pour ces derniers, les risques sont maîtrisés.

### **Le Charbon : houille, lignite, tourbe.**

2<sup>ème</sup> source d'énergie primaire dans le monde et 1<sup>ère</sup> pour la production d'électricité, les réserves en charbon sont abondantes, au moins deux siècles au rythme actuel. Le futur de cette énergie fossile se trouve sans doute dans sa gazéification et la préparation de carburants de synthèse. Pour ces derniers, la vieille réaction de Fischer Tropsch s'impose ; elle procède en 3 étapes : produire un gaz de synthèse, transformer ce gaz en cires, enfin un hydrocraquage isomérisant des cires qui conduit au GPL.

Cependant l'usage classique du charbon pose des problèmes environnementaux car sa production est accompagnée par des rejets de poussière de suie, d'oxyde de soufre et d'azote. La combustion émet un niveau élevé de CO<sub>2</sub> (deux fois plus que le gaz naturel) rendant valable son utilisation seulement s'il y a captage de ce gaz.

### **Comment réduire les émissions de CO<sub>2</sub> ?**

Responsable pour une bonne part du réchauffement climatique le dioxyde de carbone a un fort effet de serre. On peut agir en réduisant ces émissions par amélioration des rendements des moteurs et des centrales thermiques, et par stockage géologique. Il faut aussi sensibiliser les citoyens en leur rappelant l'importance des transports et de l'habitat :

- les transports représentent 25 % de la consommation d'énergie, tandis que des comportements simples pourraient réduire ce chiffre (conduite souple, limitation de la climatisation, réglages réguliers etc...)
- l'habitat représente 46 % de la consommation énergétique ; le rôle de la chimie des matériaux joue ici un rôle considérable ! Un exemple est celui des produits de la Société BASF qui permettent une isolation de la façade par utilisation de briques en polymère (Neopor) et par des matériaux à changement de phase qui limitent la déperdition énergétique (Micronal). Grâce à ces produits la consommation énergétique des bâtiments peut être divisée par 8 !

### **Energie Nucléaire**

La fission nucléaire représente environ 17 % de l'électricité dans le monde, mais 78 % pour la France... Les ressources identifiées en Uranium représentent 85 ans de production d'électricité. Mais en ajoutant la totalité des ressources conventionnelles, on atteint 270 ans et même 675 ans en ajoutant les ressources provenant des phosphates. Avec les réacteurs à neutrons rapides (qui sont très sobres) on peut espérer : 2570 ans (réserves identifiées), 8015 ans (en y ajoutant les ressources conventionnelles), 19 930 ans avec les phosphates...

Le débat porte sur les risques d'accident, la gestion difficile des déchets, les risques de prolifération et de terrorisme, le coût de la filière et la durée trop longue des démantèlements (40 ans). Les réacteurs de 4<sup>ème</sup> génération ne devraient plus produire de déchets (2040). Le futur proche concerne le *European Pressurized Reactor* (EPR), réacteur de meilleure sécurité, permettant l'optimisation du cycle du combustible.

Le futur éloigné est lié à la maîtrise de la fusion nucléaire avec une réaction du type :

Deutérium + Tritium conduit à : Hélium + énergie

Le projet « *International Thermonuclear Reactor (ITER)* » de fusion nucléaire contrôlée rassemble plusieurs pays associés dont l'Europe, les USA, la Russie, la Chine, le Canada et la Corée du Sud. Sa réussite assurerait l'accès à une formidable source d'énergie, nettement plus écologique que les précédentes, sans risque d'accident et ne produisant que quelques déchets radioactifs dont 90 % ayant des durées de vie courtes.

### **Energie Solaire**

A l'origine de toutes les énergies sur terre, à l'exception de l'énergie nucléaire, de la géothermie et de l'énergie marémotrice. Transformable en toute autre forme d'énergie utile : chaleur, électricité ou biomasse, elle utilise 3 techniques, le solaire photovoltaïque, thermique et passif.

Capter 0,01 % de l'énergie solaire serait suffisant pour nos besoins énergétiques. Mais comparons quelques chiffres :

- Production française d'électricité : 550 milliards de KWh
- Production annuelle d'un panneau photovoltaïque : 100 KWh/m<sup>2</sup>
- Surface nécessaire à recouvrir : 5 milliards de m<sup>2</sup>
- Surface de la France : 500 000 km<sup>2</sup>, soit 1% de la surface
- Surface bâtie en France : 10 000 km<sup>2</sup>, ce qui reviendrait à recouvrir 50 % des toits !

Mais... cette énergie exige un stockage (absence de lumière la nuit), condition qui constitue le point faible du solaire.

### **Energie Eolienne**

L'éolienne en Europe représente 12,4 % de la production d'énergie et seulement 1 % pour l'éolienne mondiale. La France occupe le 10<sup>ème</sup> rang dans le monde, mais avec une croissance de 42,9 %, comparée à celle de l'Europe (seulement 28,9 %) la France rattrape son retard.

Les nouvelles éoliennes à encombrement réduit, munies de pales peu fragiles, permettent l'utilisation du vent quelle que soit sa direction et sa force, et ne font pas de bruit. Les futures éoliennes présentent des pales de plus de 150 mètres de diamètre (et plus !) et produisent au moins 10 MW unitaires. Là encore se pose un problème de stockage : à titre d'exemple, on peut donner 2 solutions : électrolyse de l'eau et production d'hydrogène, ou encore la production d'air comprimé.

**L'éolien offshore** est une intéressante alternative, ne présentant pas de nuisance esthétique et de voisinage, profitant de vents plus forts et plus constants qu'à terre ; ainsi la production en mer est de 2 500 MWh par MW installé et seulement de 2 000 à terre.

### **Energie Marine**

L'énergie des mers est une ressource dont l'importance devrait croître au cours des prochaines années. Elle se décline en plusieurs techniques, fonction des opportunités que présente ce domaine si vaste et si varié :

- énergie des marées, ou énergie marémotrice,
- énergie des vagues et de la houle,
- énergie maréthermique,
- énergie hydrolienne, où l'on utilise une turbine sous-marine qui exploite les courants marins ; ressource inépuisable et prédictible, mais d'entretien difficile. Le potentiel européen est estimé à 12,5 GW, dont 20 % pour la France qui occuperait la 2<sup>ème</sup> place dans la production d'énergie par cette voie ;
- énergie osmotique, qui profiterait de la séparation eau douce et eau salée au voisinage des estuaires ; un procédé par membrane accompagné de turbines assurant une surpression, permettrait l'exploitation de cette situation. Encore expérimental, c'est là toujours un procédé d'avenir.



### **Energie et Biomasse Végétale**

C'est l'une des ressources les plus anciennes. Rappelons que le premier moteur fonctionnant à l'huile d'arachide date de 1890 ! On distingue plusieurs approches suivant la nature des matières premières utilisées.

#### ***Biocarburants de 1<sup>ère</sup> génération***

Plusieurs filières sont exploitées :

- Filière éthanol, à partir de betteraves, de céréales (1 hectare de céréales permet de produire 30 hectolitres d'éthanol), de canne à sucre ; l'éthanol peut être incorporé à l'essence, jusqu'à 5% sans modification des moteurs et davantage à l'aide d'additifs. Les inconvénients observés au début de cette utilisation, démixtion et volatilité accrue, sont maintenant maîtrisés. Une variante consiste en l'addition d'isobutène à l'alcool (15% en volume) ce qui est la meilleure façon d'incorporer l'alcool avec comme conséquence l'absence de volatilité et un indice d'octane élevé.
- Filière Huile Végétale (Biodiésel) ; il s'agit d'esters d'huiles : Esters Méthyliques d'huiles végétales, EMHV, préparé par transestérification de l'huile par le méthanol, avec formation de EMHV et de glycérine comme sous-produit.

Esters Ethyliques d'huile végétale, EEHV, où le méthanol est remplacé par l'éthanol.

- Filière butanol, à partir des mêmes matières premières ; le butanol peut être utilisé par les voitures jusqu'à 10%. Ayant une basse tension de vapeur, ce carburant est compatible avec l'eau.

#### ***Biocarburants de 2<sup>ème</sup> génération***

Afin d'éviter l'utilisation de matières premières qui sont en compétition avec les ressources alimentaires, des travaux ont été engagés pour utiliser de matières moins nobles mais sans impact alimentaire ; essentiellement ce seront les végétaux riches en lignocellulose : bois, graminées, pailles et les parties les moins valorisées de toutes les plantes. Les rendements peuvent être excellents, ainsi 13 Mt de paille et 34 Mt de bois conduisent à 7,5 Mtep d'éthanol et biogazole. Une hypothèse optimiste indique que la production pourrait atteindre 8 à 12 Mtep et le taux de substitution passer à 30%.

#### **Procédés de conversion de la Biomasse**

Outre les procédés de fermentation, les plus fréquents dans ce qui précède, on distingue les techniques suivantes : combustion, thermolyse (450-800°C) conduisant à du goudron, des huiles, et des gaz, pyrolyse (1500°C) formant des goudrons et des gaz, hydrothermolyse (250-600°C) produisant aussi des



huiles, digestion anaérobique, avec formation essentiellement de méthane, CO<sub>2</sub>, et de l'eau. C'est ce procédé qui est utilisé pour valoriser les déchets et les ordures, et qui conduit au Biogaz.

Il faut réserver une place particulière au procédé Fischer-Tropsch qui, à partir de multiples ressources (gaz naturel, charbon, coke, biomasse, déchets) permet de préparer bon nombre de produits organiques, des carburants etc...

### **Energies Renouvelables et Hydrogène**

L'hydrogène est, pour l'instant, un médiateur ou vecteur énergétique chimique de stockage des énergies renouvelables. Jules Verne fait dire à Cyrus Smith dans *L'Île Mystérieuse* : « Oui, mes amis, je crois que l'eau sera employée comme combustible, que l'Hydrogène et l'Oxygène [...] fourniront une source de chaleur et de lumière inépuisable et d'une intensité que la houille ne saurait avoir » et « l'eau décomposée en ses éléments constitutifs [...] sans doute, par l'électricité [...] ». Mais la prédiction de Jules Verne s'arrête là et l'utilisation de l'hydrogène, même si elle constitue une voie d'avenir, pose de nombreux problèmes. Rappelons tout d'abord que l'hydrogène en Europe tire ses origines de l'électrolyse de l'eau pour seulement 12% ; ce sont le pétrole (42%) et le gaz naturel (41%) qui sont les sources principales, tandis que le charbon intervient pour seulement 5%.

### ***L'hydrogène peut-il devenir une Source d'énergie ?***

Simple vecteur, une découverte récente laisse espérer une mutation qui conduirait l'hydrogène à devenir une source d'énergie, comme le pétrole par exemple. Rappelons les faits : le professeur russe Nicolay Larin a observé en Russie centrale, dans les régions de Moscou, Tula, Ryazan, Lipetsk, et Kaluga, des dégagements d'hydrogène provenant du dégazage de la planète. Par la suite, d'autres zones ont été détectées par imagerie satellitaire, aux USA, en Australie, Allemagne, Grande Bretagne etc... Par forage à une profondeur de 1 mile environ, sur les sites de ces dégazages, l'hydrogène peut être récupéré en très grande quantité et à des prix très compétitifs. Des recherches plus approfondies doivent, bien sûr, être conduites avant de parvenir à une exploitation rationnelle, mais cette découverte reste la source d'un immense espoir.

### ***L'hydrogène, oui, mais...***

Il reste de nombreux problèmes à résoudre avant une utilisation généralisée !

- le stockage, d'abord. Des réservoirs classiques peuvent être envisagés mais, compte tenu des propriétés de ce gaz, une évaporation de 0,4 à 1% par jour est observée. Pour un véhicule, en plus de cette perte,

il faut ajouter des coûts indirects en raison du poids du réservoir embarqué (environ 500kg à vide pour une autonomie de 500 à 800 km) ce qui augmente la consommation. Pour pallier cet inconvénient des recherches nombreuses s'orientent vers la réalisation de matériaux composites en profitant des propriétés d'adsorption des matériaux poreux carbonés (graphite, nanotubes de carbone) ou de composés métalliques (conduisant à des hydrures). D'autres techniques de stockage (à haute pression) sont également envisagées.

- la distribution ensuite. Des stations service existent déjà, mais en nombre trop réduit. Ce ne sont pas là des obstacles infranchissables, et la preuve en est dans les différents moyens de transport qui utilisent déjà cette ressource : des scooters aux autobus et même aux avions de tourisme. Si les objectifs déclarés étaient atteints, nous aurions résolu pour un temps les problèmes environnementaux qui préoccupent tant notre génération !

### **L'énergie, oui, mais à quel prix ?**

Quelles que soient les solutions, le coût de l'énergie augmentera à l'échelle mondiale ! A quel niveau ?

Pour certains experts, à 100 Dollars le baril, presque toutes les énergies deviennent compétitives les unes par rapport aux autres. Ce raisonnement est discutable ! il est vrai seulement si l'on place sur une même échelle tous les usages de l'énergie. Or pour les transports, il y a 2 contraintes majeures contradictoires :

- l'hydrocarbure liquide sera toujours avantageé avec une densité énergétique volumique garantissant une autonomie suffisante ;
- l'émission de CO<sub>2</sub> par les automobiles restera très difficile à réduire au-delà des économies dues au moteur, à la carburation et au comportement du conducteur.

En clair : à la différence des hydrocarbures, **aucune source énergétique ne dominera seule l'énergie mondiale.**