

# Les ressources énergétiques fossiles

Tristan FERROIR

## Introduction

Les demandes d'énergie croissante de la population mondiale, notamment par l'émergence de nouveau mode de vie dans les pays en développement, appellent à se poser des questions autour de l'indépendance énergétique et de la maîtrise des ressources énergétiques. Parmi les sources d'énergie, on peut distinguer différentes classes :

- les énergies renouvelables comme l'éolien, l'hydraulique ou le solaire qui dans la plupart des cas sont appliqués à la production d'énergie électrique
- les énergies non renouvelables qu'on peut classer en deux sous-groupes :
  - les ressources issues de la fossilisation de matière organique, c'est à dire les ressources énergétiques fossiles
  - les autres ressources comme l'uranium ou la géothermie qui sont elles aussi non renouvelables.

C'est à l'avant dernier type d'énergie que nous allons nous intéresser dans cette leçon. Les intérêts des ressources énergétiques fossiles se sont déclarés essentiellement durant la révolution industrielle au XIX<sup>ème</sup> siècle avec le recours à l'utilisation du charbon pour faire fonctionner les machines à vapeur. En quoi ces énergies fossiles consistent-elles? Comment se forment-elles? Où sont elles localisées et comment sont-elles exploitées?

## I Les différentes ressources énergétiques fossiles

Quelques unités :

1 baril = 159L de pétrole

1 TEP = 1 tonne équivalent pétrole = 7,33barils

1TEP = 42GJ

1Gtb = 0,116 GtC

1 Français consomme 4,2TEP par an soit environ 5000L de pétrole

### A Le pétrole

- Combustible fossile qui produit de l'énergie : exemple l'essence de voiture qui brûle (à montrer)
- On explique pourquoi ça brûle
- Pouvoir calorifique = 50MJ/kg

- On montre un échantillon et un affleurement
- On donne une ou deux formules chimiques pour expliquer comment marche la combustion. On laisse la formule au tableau on s'en servira plus tard!

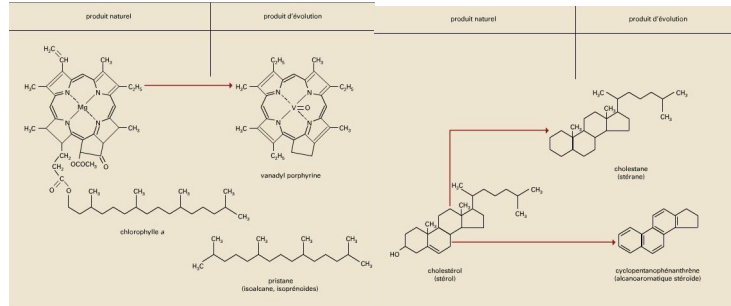


Figure 1: Quelques composants chimiques du pétrole

- Réserve estimée en barils (1bl=159L) de 275 à 1 469 gigabarils [27,5 à 147 GtC] ~ 50 ans de production

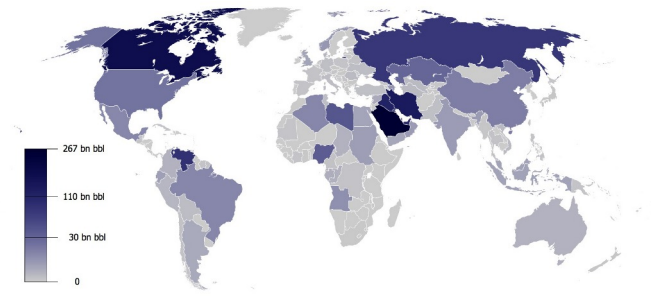


Figure 2: Localisation des réserves de pétrole mondiale

## B Le gaz naturel

- Réserves : 158 000 milliards de m<sup>3</sup> soit 150 milliards de tonnes équivalent pétrole (TEP) [109,5GtC] ~ 943Gbaril
- Pouvoir calorifique = 50MJ/kg
- En France exploitation à Lacq qui est maintenant essentiellement recyclé pour le stockage de CO<sub>2</sub>

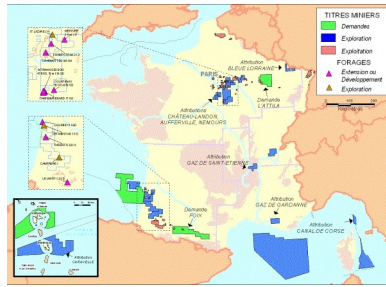


Figure 3: Production et stockage de gaz naturel en France

- Il existe des gisements un peu particuliers que sont les clathrates de méthane. Les réserves sont très importantes  $\sim 500$  à  $2500 \text{ GtC}$  mais difficiles à exploiter à cause de leur instabilité.

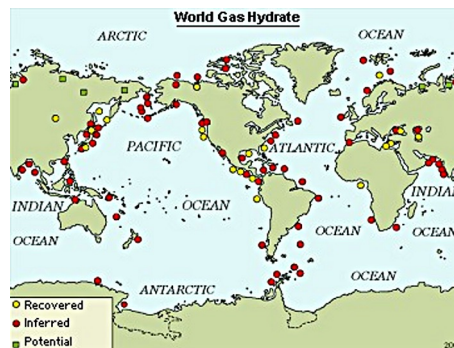


Figure 4: Localisation des gisements d'hydrates de méthane

## C Le charbon

- Combustible fossile dont les réserves sont estimées à  $1\,000 \text{ Gt}$  soit  $700 \text{ Gt TEP}$  [ $595 \text{ GtC}$ ]  $\sim 5000 \text{ Gbaril}$
- Le terme charbons désigne des des roches sédimentaires stratifiées, combustibles, de couleur sombre, formées principalement de débris végétaux. On distingue parmi ces charbons :
  - la tourbe ( $65\% \text{C}$ ), légère, brune, médiocre combustible. Ce n'est pas une roche mais un sédiment essentiellement organique en cours de diagenèse. Elle a un pouvoir calorifique d'environ  $12500 \text{ kJ/kg}$ 
    1. La tourbe blonde provient de la transformation des sphaignes. Elle est riche en fibre de cellulose et en carbone. Sa texture est dite fibrique. Ses autres traits essentiels sont sa faible densité, sa forte teneur en eau et sa pauvre teneur en cendre minérale car souvent jeune ( $2\,000$  ans).
    2. La tourbe brune provient de la transformation de débris végétaux ligneux (arbres divers) et d'éricacées. Elle est composée de fibres mélangées à des éléments plus fins, provenant d'une dégradation plus poussée des végétaux, lui donnant une texture mésique. Elle est plus âgée ( $5\,000$  ans) que la précédente.

3. La tourbe noire provient de la transformation des Cyperaceae. Elle est riche en particules minérales et organiques fines. Il y a moins de carbone et plus de cendres. La texture est le plus souvent sapsique, c'est-à-dire que la tourbe est plastique et moins fibreuse. Visuellement, la tourbe noire se distingue facilement de la tourbe blonde par sa couleur foncée. Une tourbe blonde très ancienne tend à se rapprocher, par certains caractères de la tourbe noire.
- Lignite (70-75% de C) : brun noir et terne, à débris ligneux bien reconnaissables, à pouvoir calorifique de l'ordre de 20 000 kJ/kg. Présente dans des dépôts fossiles d'âge secondaire ou tertiaire
  - Houille (s.l.) ou charbon (85% de C) : noir, mat ou brillant, tâchant les doigts. Bon combustible 32 000kJ/kg
  - Anthracite (95% de C) : noir, brillant, ne tâchant pas les doigts. Elle possède le pouvoir calorifique le plus élevé : > 40 000kJ/kg
- Attention à cette série dite classique : la majorité des tourbes actuelles sont faites de sphaignes donc de Bryophytes et des charbons de ces-derniers sont rares. De plus, les tourbières actuelles sont rarement dans des zones subsidentes et ne donneront donc certainement pas de charbons.

## II Modes de formation des ressources énergétiques fossiles

### A Origine et maturation de la matière organique

#### A.1 Origine de la matière organique

- On revient sur la formule du pétrole et on montre que cela dérive de molécules organiques classiques (chlorophylle, cholestérol...)

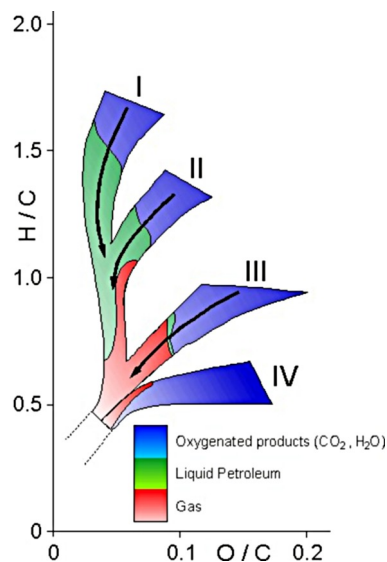


Figure 5: Diagramme de Van Krevelen présentant les différents types d'évolution des kérogènes en fonction de leur origine

- Diagramme de Van Krevelen indispensable : la matière organique se caractérise par deux rapports, H/C et O/C. En remplaçant dans un diagramme H/C en fonction de O/C les différentes matières organiques, on peut distinguer 4 grands types de kérogènes avant maturation.
- On distingue ainsi 4 grands types de matières organiques en fonction de leur environnement de dépôt qui donnent ces 4 kérogènes différents :
  - **Le type I** se caractérise par des valeurs élevées de H/C et assez faibles de O/C. il s'agit de kérogène contenant très peu de composés aromatiques et/ou hétéroatomiques (contiennent N,S,O). Le "kérogène-type" de cette famille **correspond à du matériel** très aliphatique, **supposé d'origine algaire** (dérivant par exemple de Botryococcus braunii) ou bactérienne, **ayant sédimenté dans des environnements laguno-lacustres** parfois très restreints (très forte alcalinité ou salinité). Les kérogènes de la formation "Green River Shales" (sont typiques de cette famille). Les bogheads (appelés aussi torbanites ou coorongites) d'Autun est un exemple de cette classe de kérogènes. Le processus de préservation sélective est à l'origine de ces kérogènes.
  - **Le type II** se caractérise quant à lui par des valeurs de rapports atomiques H/C et O/C intermédiaires entre le type I et le type III. Ces kérogènes sont supposés **d'origine marine et issus de matériel dérivé du phytoplancton, du zooplancton et des bactéries**. Ces kérogènes sont à l'origine de nombreux pétrole brutes et gaz à travers le monde (Devonien et Crétacé du Canada, Silurien du Sahara). Les kérogènes isolés des sédiments du Toarcien du Bassin de Paris correspondent aux kérogènes typiques de cette famille.
  - **Le type III** se caractérise par des rapports atomiques H/C faibles et O/C très élevés. Les kérogènes de cette famille proviennent de l'**accumulation de matériel issu de végétaux supérieurs**. Ils sont constitués par des structures aromatiques et se caractérisent par les nombreuses fonctions oxygénées qu'ils contiennent. Les kérogènes du bassin de Douala (Cameroun) sont typiques de cette famille. Ces kérogènes **constituent de nombreux charbons** (lignites, houilles et anthracite) **et roches mères de pétrole** (ex : gisements indonésiens). Le type III peut également correspondre à de la MO de type I ou II très dégradée
  - **Le type IV** correspond à du matériel organique continental ou marin caractérisé par un rapport H/C faible et associé à de très fortes valeurs de O/C. Cette famille correspond à du **matériel remanié ou très oxydé**. Des kérogènes typiques de cette famille ont été observés dans des sédiments d'âge Crétacé de la baie de Biscaye (Espagne). Ils ne constituent aucun gisement d'intérêt économique.
- Les hydrates de méthane sont produits par interaction de méthane formé lors de la diagenèse précoce par l'oxydation de matière organique avec de l'eau en profondeur (plaines abyssales, glacis et bas du talus continental) pour former des cages de formules  $CH_4, n(H_2O)$

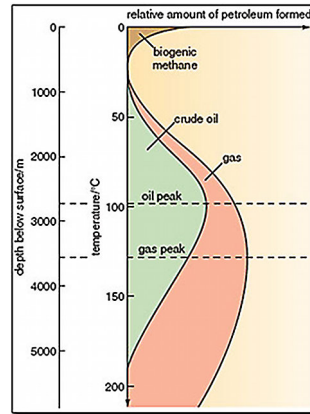


Figure 6: Zone de maturation des différents produits de la matière organique

## A.2 Maturation de la matière organique

L'évolution de la matière organique lors de son enfouissement ou maturation se fait essentiellement de façon thermique. Il s'agit d'un craquage qui d'une part coupe certaines liaisons (craquage thermique) et d'autre part appauvrit la matière en volatils et l'enrichit donc en carbone. Ainsi les rapports H/C et O/C du diagramme de Van Krevelen diminuent au cours du temps.

On distingue ainsi différentes phases :

1. la diagenèse précoce : oxydation de la matière organique par des micro-organismes et formation de méthane par les méthanogènes
2. la diagenèse thermique : elle est liée à l'enfouissement donc à une augmentation de pression et de température. Les mécanismes thermo-catalytiques conduisent à une perte d'azote et d'oxygène
3. la zone de catagenèse : il y a un craquage thermique de la matière organique précédemment réduite lors de la diagenèse thermique qui conduit à une séparation entre les phases fluides et solides : c'est la fenêtre à huile. C'est à cette étape que se produisent les migrations qui conduisent à la formation des gisements.
4. la zone de métagenèse : elle est caractérisée par la formation de graphite cristallin et la libération de méthane

## B Devenir des roches combustibles formées : leur devenir en tant que ressource

- Le charbon reste en place
- Pétrole et gaz eux vont subir une ou plusieurs migrations depuis leur lieu de formation (roche-mère) jusqu'à leur lieu de stockage (réservoir)
- De la roche réservoir dépendra le stockage du pétrole. Un réservoir doit avoir une bonne porosité (suffisamment de vide où les hydrocarbures vont à un moment remplacer l'eau) et une bonne perméabilité (pour que le pétrole et le gaz puissent se déplacer rapidement quand on va les pomper pour les exploiter). Une roche qui

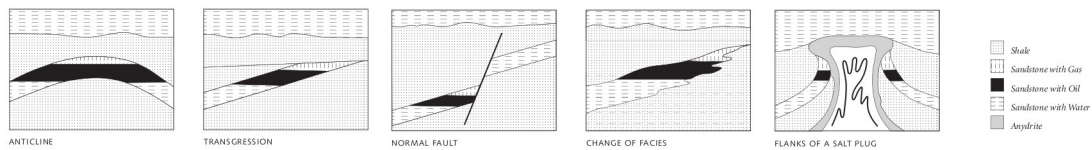


Figure 7: Les différentes configurations d'un piège à huile

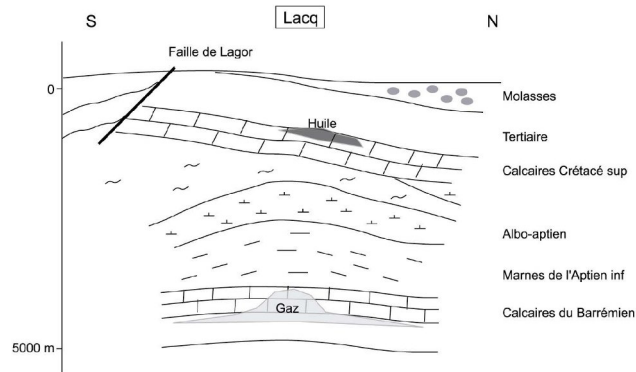


Figure 8: Coupe géologique de la région pétrolière de Lacq

possède à la fois une bonne porosité et une bonne perméabilité est un réservoir. Plus ces deux caractéristiques pétrophysiques de la roche seront bonnes, meilleur sera le réservoir. Si la roche est fracturée, ses qualités de réservoir sont améliorées. Les roches bon réservoir sont, dans la plupart des cas, des grès ou des carbonates (calcaires et dolomies). Les argiles possèdent beaucoup de vides entre les particules qui les composent, mais ces particules ayant la forme de feuillets empilés serrés les uns contre les autres, leur perméabilité est quasi nulle.

- Ce réservoir doit être surmonté d'une roche couverture imperméable. Les roches couvertures sont souvent des argiles et parfois des couches de sels cristallisés. Mais n'importe quelle roche suffisamment imperméable peut faire l'affaire, certains carbonates très compacts par exemple.
- Cet ensemble peut former un piège à huile dont les configurations peuvent être distinctes.
- On peut citer l'exemple de Lacq en France qui a assuré l'indépendance énergétique de la France jusqu'au début des années 70 en terme de pétrole. On peut ainsi replacer les différentes notions présentées précédemment sur cette coupe.

### C Les grandes périodes géologiques productrices de roches carbonées

- Ere Primaire : carbonifère et permien. C'est le cas de l'essentiel de gisements de houille en France
- Ere Tertiaire : Trias et début du Jurassique. C'est le cas du pétrole du moyen orient.

### III De l'exploration à l'exploitation

Pour une compagnie pétrolière, l'exploration et surtout l'exploitation sont sous-tendu par une notion de rentabilité. Ainsi, une compagnie pétrolière doit trouver le meilleur compromis entre coût engagé et profit tiré.

#### A La prospection

- Dans le cas du charbon, lorsqu'un filon est trouvé, l'exploration et l'exploitation sont souvent plus aisés que dans le cas des hydrocarbures.
- Dans le cas du pétrole, différentes approches se succèdent, de la moins coûteuse à la plus coûteuse :
  - il faut d'abord trouver une région susceptible de receler du pétrole ou du gaz : soit il y a déjà des champs pétroliers à proximité, soit il y a eu des dysmigrations c'est à dire des fuites du réservoir pétrolier vers la surface. Ce choix de région peut aussi passer par des études de terrain montrant des traits géologiques communs avec des régions à hydrocarbures déjà connue.
  - Une fois la région trouvée, on effectue une prospection géologique : c'est la première étape, qui permet de repérer les zones sédimentaires méritant d'être étudiées (plissements, failles. . .). Les géologues utilisent des photographies aériennes et des images satellites puis vont sur le terrain examiner les affleurements. Ces derniers peuvent en effet renseigner sur la structure en profondeur. Ensuite l'analyse en laboratoire d'échantillons de roche prélevés permet de déterminer l'âge et la nature des sédiments afin de cerner les zones les plus prometteuses. Cette étape représente 5 % du budget consacré à la prospection.
  - Puis, on utilise la prospection géophysique comme la sismique réflexion ou la gravimétrie. Son objectif : donner le maximum d'informations pour que les forages soient entrepris ensuite avec le maximum de chance de succès. Il s'agit essentiellement d'accumuler des données sismiques riches en informations par sismique réflexion. Les pièges possibles mis en évidence sont classés selon leur probabilité d'existence et leur volume prévisionnel. Cette étape représente 15 % du budget consacré à la prospection.
  - Enfin, on réalise un forage d'exploration qui seul permet de certifier la présence de pétrole. On perce la roche à l'aide d'un trépan. À terre, l'ensemble du matériel est manipulé à partir d'un mât de forage. En mer, l'appareil de forage doit être supporté au-dessus de l'eau par une plateforme métallique spécialement conçue. Le coût du forage d'exploration varie de 500 000 euros à terre, à 15 millions d'euros pour les puits en mer. Cette étape qui dure de 2 à 6 mois est la plus lourde dans le budget d'exploration : 60 % en moyenne.
- Enfin, après un plan d'exploitation et des études de rentabilité, l'exploitation peut-être en lancée. En moyenne, sur 5 forage d'exploration, un seul amène à la mise en place d'une exploitation.

#### B L'exploitation

- L'exploitation du charbon se fait essentiellement en mines à ciel ouvert ou sous-terre



- Pour le pétrole on met en place une installation pétrolière. L'extraction du pétrole ou du gaz se passe en plusieurs étapes
  - l'extraction primaire (40% des gisements) : c'est la plus simple, le fluide jaillit de lui-même expulsé par la pression présente dans le réservoir. On peut récupérer de 5 à 40% du pétrole selon cette "technique"
  - l'extraction secondaire (58% des gisements) : la pression de fluide diminuant au fur et à mesure, lorsque les hydrocarbures ne sortent pas/plus d'eux mêmes, on réalise des injections soit d'eau (c'est souvent le cas en mer), soit du gaz coproduit lorsque sa quantité est trop faible pour être revendu, soit de CO<sub>2</sub>. On atteint ainsi une extraction de l'ordre de 25 à 35%
  - l'extraction tertiaire (2% des gisements) : on diminue la viscosité du fluide par diverses techniques

Ainsi le taux moyen de récupération du pétrole à l'heure actuelle est d'environ 35%.

### C Les conséquences environnementales et l'avenir économique

- Les déchets des plates-formes en mer : mis en évidence par Greepeace lors de la volonté en 1995 par Shell de faire couler son installation off-shore de Mer du nord pesant 45 000 tonnes. Certains structures sont en partie recyclable (en hotel de luxe par exemple dans le Golfe du Mexique ou en récifs à coraux) mais ce n'est pas possible pour l'ensemble des plates-formes. Outre l'aspect environnemental, l'abandon total comme partiel de ces structures constitue un obstacle dangereux à la navigation des navires et des sous-marins, ainsi qu'à la pêche notamment par chalutage.
- Protection de l'environnement, combustion provoquant la formation de gaz à effet de serre, destabilisation des clathrates de méthane, exploitation non conventionnelle (sables bitumineux et schistes bitumineux par exemple)
- Systèmes économique des pays essentiellement basés sur le pétrole

## Conclusion

Les ressources énergétiques fossiles sont issues de l'enfouissement et de la transformation de la matière organique. Etant donné leur caractère fossile elles sont d'une part non renouvelable et d'autre part, la différence de temps entre leur formation et leur exploitation est considérable. Par ailleurs, l'augmentation de la demande des pays émergents en énergie diminuent fortement les projections des ressources énergétiques et conduira certainement à l'exploitation des ressources non-conventionnelles beaucoup plus polluante.

Trois pistes sont envisageables :

1. Une amélioration des techniques de récupération, d'exploitation et de prospection : cela tient essentiellement a un travail des laboratoires de recherches et développement
2. Un passage à des énergies renouvelables : géothermie, centrale solaire, éolienne, marémotrice ou bien encore fusion nucléaire
3. Une diminution forte de la demande énergétique mondiale

Pétrole	
Réserves prouvées actuelles	145 Gt
Découvertes nouvelles	100 Gt
Accroissement du taux de récupération	100 Gt
Sables bitumineux, asphaltes	80 Gt
<b>TOTAL</b>	<b>425 Gt</b>

Table 1: L'avenir du pétrole

Pour terminer, les projections actuelles montrent que sans volonté politique, les demandes de pétrole en 2020 seront de l'ordre de 10GTep par an ce qui laisse 20 ans de réserves pétrolières....

## Bibliographie

- Biju-Duval - Géologie sédimentaire
- Cojan-Renard - Sédimentologie
- Perrodon - Géodynamique pétrolière
- Universalis