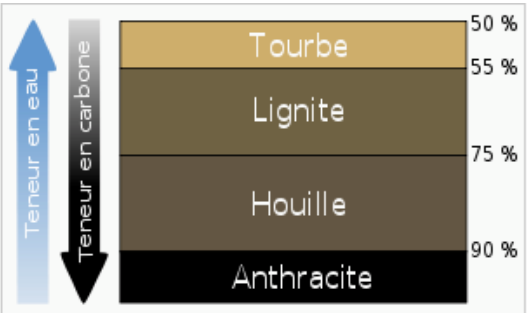
Les roches carbonées

Ressources et énergie

1- Exemples de roches carbonées

- Comme leur nom l'indique, ces roches renferment du **carbone (C)**.
- Cela leur donne une **couleur noire et un pouvoir calorifique** plus ou moins important (conditionné par le % de C qu'elles renferment), d'ou leur exploitation économique.
- Ces roches carbonées se présentent sous différentes formes :

Sous la forme de roches solides, c'est l'exemple des **charbons** (au sens large) :



Principaux types de charbon

Lignite (55 à 75 % de C)

Houille (75 à 90 % de C)

On voit sur les deux exemples présentés que ces roches sont **sédimentaires** : présence de strates.

Sous la forme fluide : ce sont les pétroles (liquides) et les gaz :

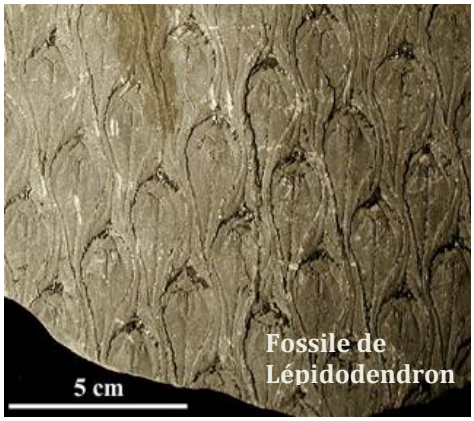
2- Origine du carbone de ces roches

- Pour les charbons :

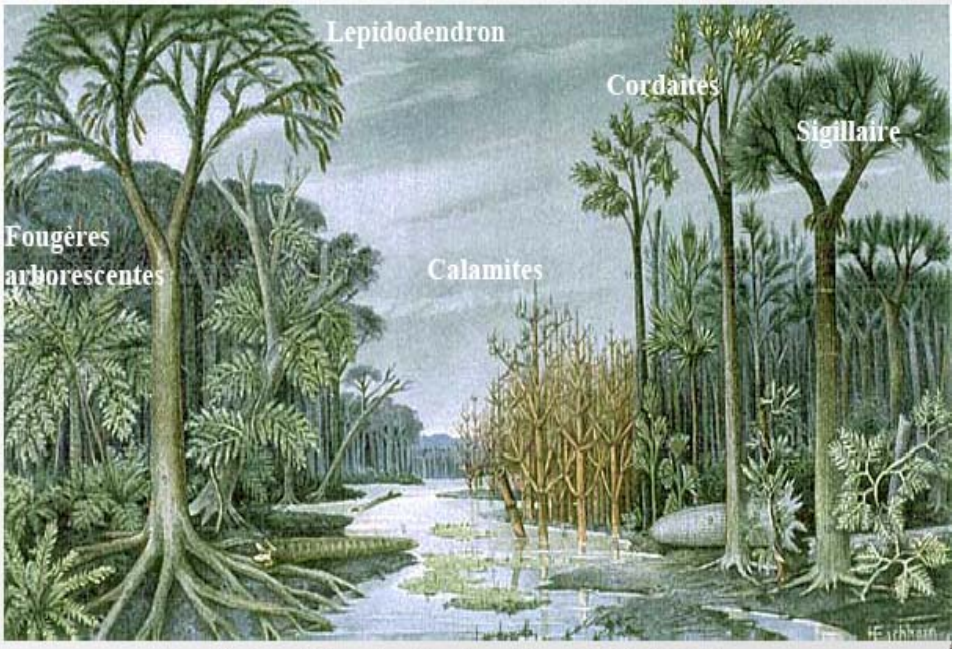
Lorsqu'on observe les roches carbonées telles que la tourbe ou le lignite, on peut encore y retrouver des restes de végétaux continentaux. Dans la houille (appelée communément charbon) observée au microscope à fort grossissement, on peut observer des restes de végétaux comme des spores de fougères, des cuticules de feuilles, des restes de parois cellulaires…

Exemple d'une lame mince dans un charbon, observée en microscopie. On distingue en jaune/orangé des spores toutes compactées dans l'axe Est/Ouest.

D'autre part, dans les gisements de charbon, on retrouve souvent des niveaux schisteux associés avec de très beaux fossiles de végétaux terrestres :



Les plantes fossiles ci-dessus datent du Carbonifère (- 340 millions d'années) : de nombreux gisements de charbon se sont formés à cette période. Ces fossiles ont permis de reconstituer la végétation de l'époque : la forêt houillère.



Forêt houillère du Carbonifère (~340 Ma)

C'est **l'accumulation, la préservation, et l'enfouissement** de **débris végétaux continentaux** tels que ceux rencontrés dans la forêt houillère, qui ont donné naissance aux charbons (qu'on a exploité par exemple dans le Nord de la France et dans le Massif Central).

En effet, les végétaux sont formés de molécules organiques : protides, lipides et glucides, plus ou moins riches en carbone. Par exemple, **la lignine et la cellulose** sont des molécules constitutives des **plantes terrestres**, et sont très riches en carbone.

Le processus par lequel les végétaux sont capables de fabriquer des molécules organiques à partir du carbone atmosphérique est **la photosynthèse**. Lorsque cette matière est préservée sous la forme de roche carbonée, on dit parfois qu'on a fossilisé de l'énergie solaire (cf. programme de seconde).

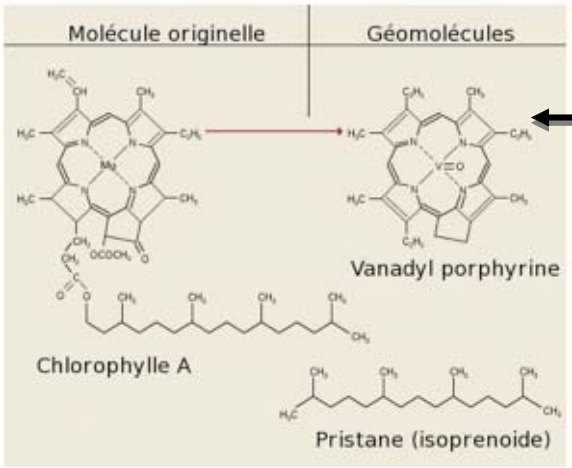
- **Pour le pétrole :**

Le pétrole est une roche carbonée liquide qui est formé par de très nombreuses molécules chimiques plus ou moins riches en carbone. D'ou son **intérêt économique** comme **combustible**, mais également dans **l'industrie pétrochimique**.

Il renferme par exemple de nombreux alcanes : $CH_3—(CH_2)_n—CH_3$, qui sont de grandes chaînes hydrocarbonées (hydro pour hydrogène et carbonée pour le carbone), d'ou le nom d'**hydrocarbures** donné souvent aux combustibles.

Le nombre d'atomes de carbone dans la chaîne va conditionner l'état liquide ou gazeux de ces roches carbonées. Quand C<5, on a du gaz (le gaz naturel est essentiellement formé de méthane CH_4) ; quand C>5, on passe à l'état liquide ; et à partir de C 17, on passe à l'état solide.

L'origine des pétroles a longtemps été discutée. C'est avec la mise au point de techniques d'identification des molécules (chromatographie en phase gazeuse) qu'on a pu prouver leur origine :



En identifiant les molécules du pétrole, on a mis en évidence la molécule complexe ci-contre. Celle ci ne peut dériver que d'un composant naturel des végétaux : la chlorophylle.

Avec ces **« fossiles moléculaires »,** on montre que les pétroles, comme les charbons, sont issus de la **sédimentation, préservation et transformation de matière organique en partie d'origine végétale.**

D'autres études montrent que la matière organique à l'origine des pétroles est essentiellement **marine ou lacustre**, et qu'elle est surtout issue du **phyto- et du zooplancton**.

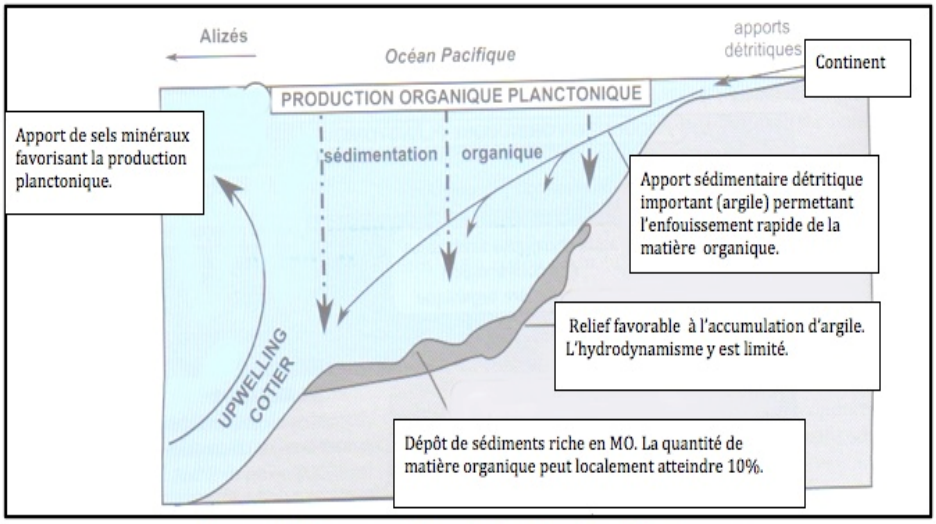
3- Le problème de la préservation de la matière organique

Quand on étudie la teneur en matière organique d'un sédiment (cf. fiche « Roches sédimentaires »), on trouve des valeurs très faibles, de **l'ordre de 1%.** En effet, pratiquement toute la matière organique produite va être recyclée au cours du temps (par des organismes, par des processus d'oxydation…) : voir la fiche « Cycle du carbone » et le programme de seconde.

A l'origine de la formation des roches carbonées, il y a donc des **environnements favorables à la préservation de la matière organique** :

- **Les milieux de haute productivité**, où beaucoup de matière organique est produite : c'est le cas de la luxuriante **forêt houillère** (voir l'image ci-dessus) et, dans les océans, des **zones d'upwelling** (équateur, bordures Ouest des continents : voir la fiche « Upwelling en océanographie) qui amènent beaucoup d'éléments nutritifs.

- **Les milieux faiblement oxygénés**, voir réducteurs, favorisent la préservation de la matière organique. Cette faible oxygénation du milieu peut être liée à son caractère confiné, ou à une grande productivité qui va consommer l'oxygène plus vite qu'il est renouvelé.



Le modèle du upwelling côtier des côtes péruviennes

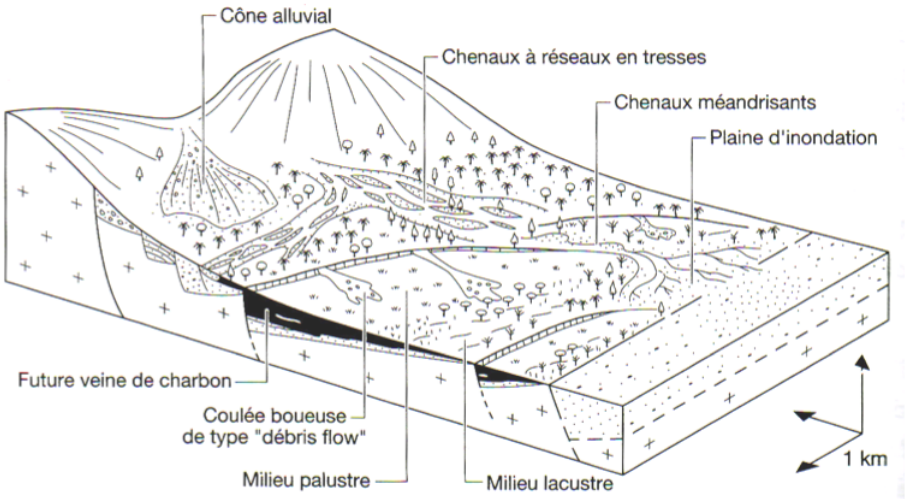
Exemple d'environnement favorable en milieu marin : Côte péruvienne

Upwelling : Forte productivité

Enfouissement rapide de la MO par des sédiments argileux de granulométrie fine, cela isole rapidement la MO des circulations d'eau, et donc de l'oxygène.

Préservation importante de la MO, jusqu'à 10%.

En milieu continental, les charbons se sont formés le plus souvent dans des secteurs de transition Terre/mer de type delta, ou dans de petits bassins intra-montagneux comme dans l'exemple ci-dessous :



Exemple d'environnement de dépôt des charbons du Massif Central – Domaine continental

La matière organique s'est déposée au cours du Carbonifère dans de petits bassins en zone montagneuse, confinés, avec un recouvrement rapide par les produits d'érosion des reliefs avoisinants.

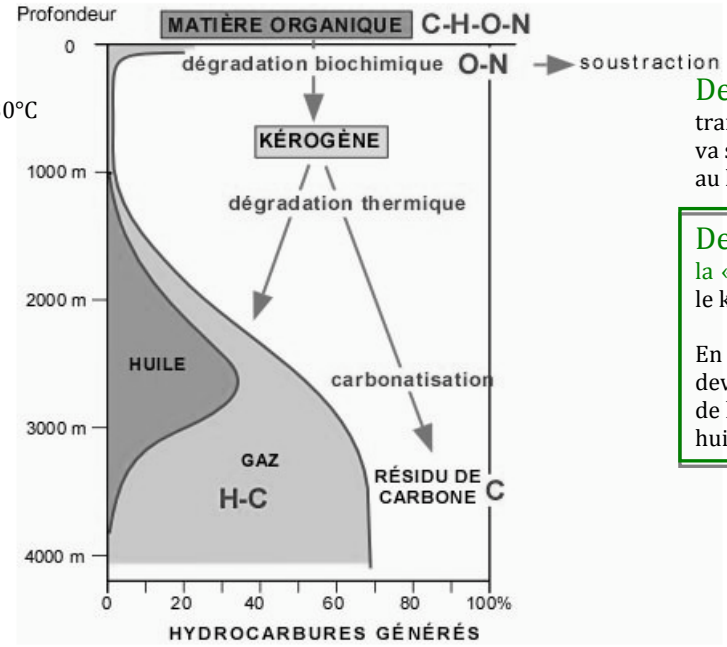
Pour former des roches carbonées, il faut donc des environnements particuliers qui vont non seulement favoriser la **préservation** de la matière organique, mais permettre également **son évolution au cours du temps** afin de donner des roches carbonées.

4- Transformation de la matière organique en roches carbonées

La matière organique qui a échappé au recyclage est progressivement **enfouie**. Cet enfouissement entraine une augmentation de la pression et de température (le gradient géothermique moyen étant de 30°C/km) de la matière organique.

Pour comprendre ce qui se passe au cours de l'enfouissement, regardons le diagramme ci-dessous :

10° à 30°C

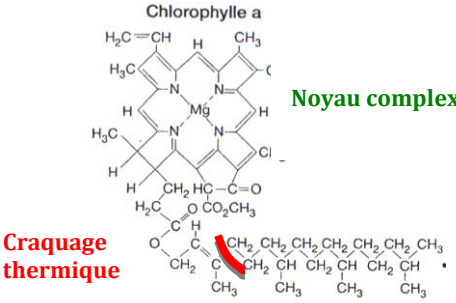


De 0 à 1000 m : ce sont surtout des transformations liées aux microorganismes que va subir la MO. Ces transformations aboutissent au **kérogène**.

De 1000m à 3000m : c'est le domaine de la « fenêtre à huile ». C'est dans ce secteur que le kérogène va donner des hydrocarbures.

En effet, dans ce domaine, les T° atteintes vont devenir suffisantes pour couper les molécules de kérogène, et libérer dans le milieu les huiles :

Illustration de la formation d'huile à partir de la molécule de chlorophylle :



L'enfouissement de la chlorophylle dans le domaine de la fenêtre à huile (1000 à 3000m), avec des T° de 30 à 90°C, va permettre son craquage thermique : on va couper la molécule et libérer ainsi dans le milieu le noyau complexe et une longue chaine Carbone/Hydrogène = un des composants des pétroles.

Libération d'une grande chaine hydrocarbonée : huile

Au delà de 3000m : La T° continue à augmenter, et le kérogène va « perdre » toutes ses chaines hydrocarbonées, grandes (cela donne les huiles) ou courtes (cela donne le gaz), par craquage thermique. A la fin, le kérogène ne va plus renfermer que des molécules très riches en carbone (comme les cycles) = résidu carboné ou charbon.

On voit qu'au delà de 3000 m, la fenêtre à huile disparaît : en effet, si on poursuit l'enfouissement des huiles formées entre 1000 et 3000 m, celles ci vont être à leur tour craquées en plus petites chaines, ce qui fait qu'au delà d'une certaine profondeur d'enfouissement, on a plus que des gaz.

Donc, pour donner des roches carbonées, la matière organique doit être enfouie, et sous l'effet de **l'augmentation de la T°,** elle pourra donner des huiles, du gaz et un résidu carboné.

Cet enfouissement est souvent lié à des environnements sédimentaires qui sont dits **subsidents** (mouvement vertical vers le bas de la lithosphère au cours du temps), et qu'on appelle **bassins sédimentaires.** (Cf programme de 1ère S, avec les marges passives, bassins sédimentaires, qui présentent un ensemble de caractéristiques favorables à la formation d'hydrocarbures).

Ce diagramme montre l'importance de l'enfouissement (pas trop faible, pas trop poussé), si on veut avoir des hydrocarbures !!

A ce stade, le pétrole n'est pas encore exploitable, car il est trop disséminé. On va voir comment celui-ci va pouvoir se concentrer dans des secteurs exploitables économiquement : les gisements.

5- Formation des gisements : migration du gaz et des huiles

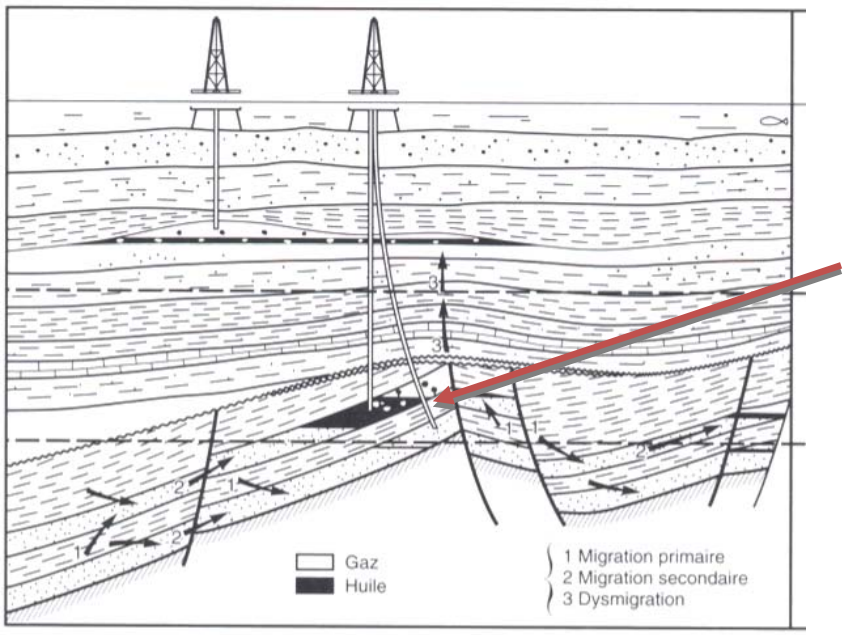
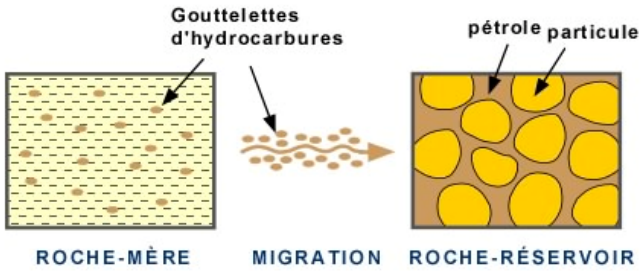


Figure issue de B. Biju-Duval, *Géologie sédimentaire*, ed. Technip

Lorsqu'on regarde les gisements exploités, on constate que les huiles et les gaz sont **concentrés** dans un secteur donné = **piège.**

En effet, lorsque les huiles et gaz se forment au cours de l'enfouissement, ils sont peu denses, et vont avoir tendance à remonter vers le haut : **processus de migration.**



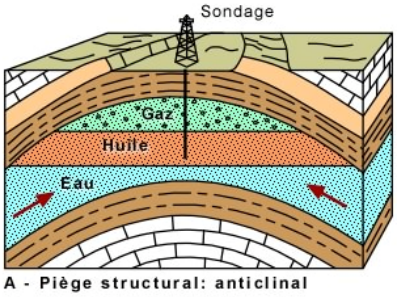
(Figure site université Laval – Québec)

Les gouttelettes d'hydrocarbures vont d'abord se déplacer au sein de la roche qui leur a donné naissance ou **roche mère**, on parle de **migration primaire** (en 1 sur la figure ci-dessus).

Puis, les huiles vont se déplacer vers une roche **réservoir, perméable et poreuse**, qui va les stocker. C'est la **migration secondaire (en 2).**
La roche réservoir doit être perméable pour que les huiles puissent se déplacer, et poreuses pour qu'elles puissent y être stockées. Ce sont le plus souvent **des calcaires ou des grès.**

Pour former un piège, il faut que la migration soit stoppée. C'est le cas quand on a au dessus de la roche réservoir **une roche imperméable : le plus souvent, ce sont des argiles ou des évaporites (sel) qui forment ce niveau imperméable.**

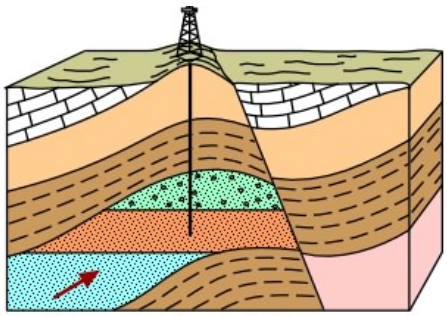
Exemples de pièges recherchés pour l'exploitation :



(Figure site université Laval – Québec)

Exemple d'un piège anticlinal avec une couche imperméable au sommet.

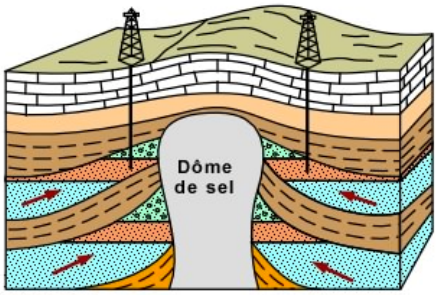
Les fluides se déplacent, des points de plus forte pression aux points de plus faible pression, c'est-à-dire de bas en haut (flèches rouges). Ces fluides sont un mélange d'eau et de gouttelettes d'huile et de gaz. A cause de la barrière à la migration que forme la couche imperméable, les fluides s'accumulent dans la partie haute du pli. Il se fait une séparation des phases selon leurs densités respectives (comme dans un pot de vinaigrette). Le gaz occupera la partie la plus haute, suivi de l'huile puis de l'eau.



B - Piège structural: faille

Une autre situation propice à la formation d'un piège est offerte lorsque les fluides circulant dans une couche perméable sont coincés sous des couches imperméables dans un biseau formé par le déplacement des couches à la faveur d'une faille (piège structural B).

(Figure site université Laval – Québec)



D - Pièges mixtes associés à un diapir

Il y a aussi des pièges qui sont associés aux dômes de sel (pièges mixtes D). Lorsque les diapirs de sel se sont mis en place (un peu à la manière d'un intrusif), ils ont retroussé les couches et créé des biseaux qui sont scellés par les couches imperméables et par le sel lui-même, qui est imperméable.

(Figure site université Laval – Québec)

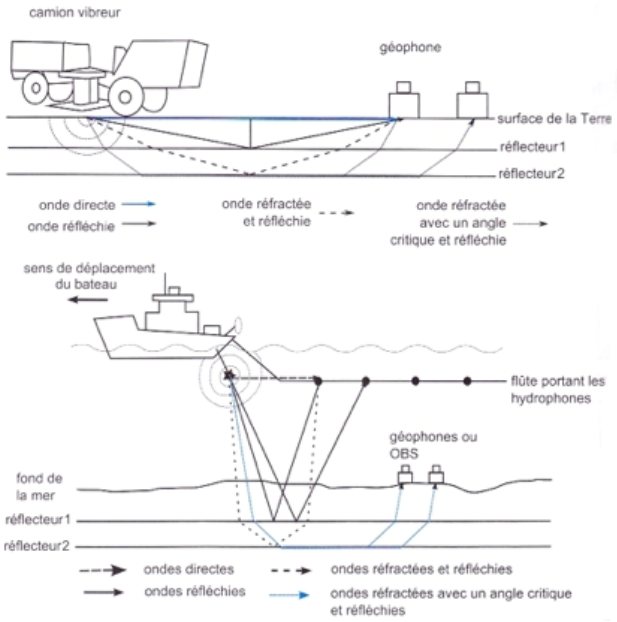
6 – Prospection / exploitation des gisements

(copie de la page du site : http://acces.ens-lyon.fr/acces/terre/CCCIC/ccl/petrole/comprendre/lexploitation-des-combustibles-fossiles)

La prospection

Aux débuts de l'exploration pétrolière, on pouvait se contenter de forer les pièges visibles en surface, en général des anticlinaux. Mais on s'est très vite rendu compte que cela ne suffisait plus : beaucoup de structures sont masquées par les dépôts de sédiments. De plus, les pièges situés sous la mer sont complètement invisibles à l'œil.

A partir des années 1930 s'est développée la méthode miracle : **la sismique réflexion-réfraction.**



Principe de la sismique-réflexion et de la sismique-réfraction.

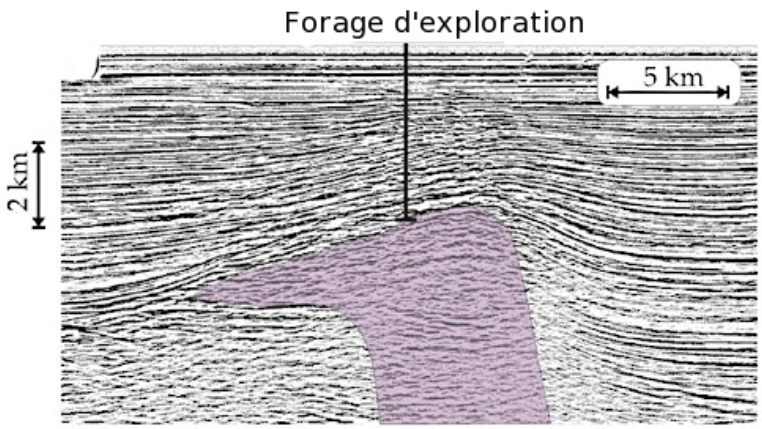
En haut du document un camion vibreur, et dessous un bateau sismique.

Les **ondes sismiques sont crées artificiellement** grâce à des explosifs, des décharges électriques, la chute d'un poids, ou des canons à air ou eau. Il existe trois types d'ondes enregistrées : directes , réfléchies et réfractées.Ces deux dernières existent au niveau d'un réflecteur qui sépare deux couches de nature différente (compacité, nature chimique, densité...).

Des récepteurs enregistrent le temps d'arrivée des ondes : ce peut-être un **hydrophone**, (piezomètre qui transforme les variations de pression de l'eau en courant électrique), un **OBS** (*Ocean Bottom Seismometer,* ensemble de sismomètres) ou un **géophone** (capteur sensible à la vitesse de déplacement du sol).

La sismique réflexion utilise les ondes réfléchies et permet de dresser des profils sismiques qui révèlent les différents réflecteurs du sous-sol ainsi que les structures (plis et failles).

La sismique réfraction permet de déterminer la vitesse des ondes sismiques (P) donc la nature des roches traversées.



La structure colorée en mauve est un diapir salifère qui a migré latéralement sous le poids des sédiments. Le dôme formé par les sédiments par l'intrusion du sel est propice au piégeage des hydrocarbures. Cependant, seule de faibles quantités de gaz ont été trouvées.

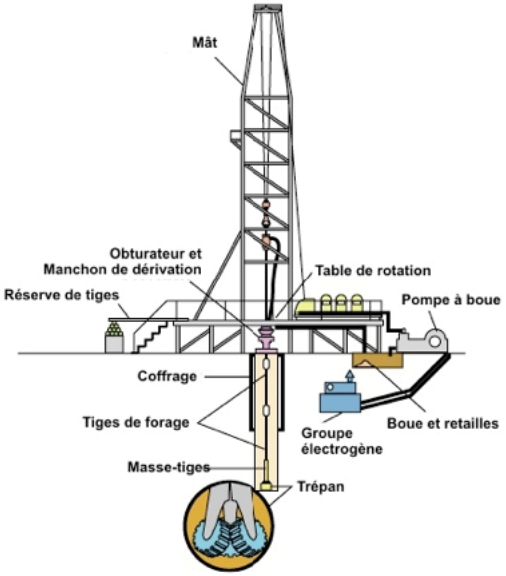
Les résultats de la sismique-réflexion : La structure superficielle du bassin néo-écossais. Les lignes horizontales correspondent aux réflecteurs sismiques évoqués précédemment. (*source www.rncan.gc.ca*)

Afin d'obtenir une image plus précise et plus fiable du sous-sol, on emploie la technique de la sismique 3D, beaucoup plus efficace que la 2D. Elle permet même souvent de repérer directement les hydrocarbures dans les couches géologiques. Les récepteurs sont placés en nappes afin de construire une image du sous-sol en volume. La technique de la sismique 4D va plus loin encore, en faisant intervenir la quatrième dimension : le temps. Sur un gisement en production, on effectue plusieurs enregistrements successifs de sismique 3D, à intervalles de temps réguliers. La comparaison des enregistrements permet ensuite de suivre l'évolution du gisement pendant sa production.

L'étude des forages existants, de l'histoire tectonique et sédimentaire de la région vient compléter les données de la sismique. On précise la géométrie du réservoir et la quantité d'hydrocarbures qu'il pourrait contenir. C'est après cette approche plus systémique que l'on décide ou non de réaliser un forage d'exploration.

L'exploitation des gisements.

Les forages sont généralement compris entre 2000 et 4000 m de profondeur. Le diamètre du trou de forage est de l'ordre de 20 à 50 cm. Si nécessaire, on peut remplacer les tiges et le trépan par un carottier pour recueillir des échantillons de roches.



Le forage Rotary. Les tiges dans le derrick (structure métallique de plusieurs mètres de haut) entraîne l'ensemble.

Le procédé essentiel de l'exploration et de l'exploitation des gisements pétrolifères reste le *forage rotary à la boue*. Le *forage rotary* permet d'atteindre de grandes profondeurs dans de bonnes conditions techniques et de sécurité. Le trépan, instrument généralement muni de rouleaux dentés, est animé, au fond du puits, d'un mouvement de rotation par les tiges de forage, tiges d'acier cylindriques, creuses et vissées les unes aux autres jusqu'à la surface du sol. Des pompes à boue assurent une injection continue de boue dans le puits, afin d'évacuer les déblais de terrain découpés par le trépan au fur et à mesure de son avancement. Lorsqu'une certaine portion du puits a été forée, on est amené à en cuveler les parois, pour les maintenir, par la descente d'une colonne de tubes d'acier (le tubage du puit).

Implications économiques et environnementales

Il y de nombreux exemples de conséquences environnementale à traiter dans cette partie :

- Dans les conséquences environnementales de l'exploitation du charbon, on peut citer : les « coups de grisou », les affaissements de terrain au dessus des mines, la pollution engendrée par les terrils.

- Au sujet du pétrole, les marées noires et les conséquences et l'exploitation des schistes bitumineux.

- La combustion du charbon et du pétrole avec les pluies acides, l'augmentation du CO_2 dans l'atmosphère et les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP).