

Pétrole & CO₂

Quels défis géologiques
pour l'avenir ?

UMONS
Université de Mons


**POLYTECH
MONS**


ApplicaSciences
Cellule de Diffusion des Sciences - POLYTECH MONS


Service public de Wallonie

En bref ...

Certaines roches ont des propriétés physiques particulières qui en font de formidables réservoirs naturels. L'homme exploite des hydrocarbures à partir de ces réservoirs depuis près de 150 ans mais il reste encore aujourd'hui des milliards de tonnes de pétrole enfouis sous nos pieds. Les défis du futur consisteront essentiellement à développer des technologies pour exploiter des réservoirs à très grande profondeur (plus de 5000 m) et à résoudre le problème des émissions de CO₂, gaz à effet de serre provenant en partie de la combustion des hydrocarbures. En ce sens, le stockage géologique du CO₂ peut représenter une contribution non négligeable dans les questions environnementales et suggère aussi des perspectives intéressantes, également en Belgique (stockage en veine de charbon).



Fanny Descamps, diplômée Ingénieur Civil des Mines et Docteur en Sciences de l'Ingénieur, est aujourd'hui chargée de recherche pour le FNRS. Ses travaux portent sur l'étude du comportement des roches dans les conditions de grande profondeur. Cela concerne non seulement les effets des contraintes mécaniques mais aussi ceux des fluides interstitiels (comme c'est le cas dans un réservoir pétrolier) et de la température (gradient géothermique).

Après une thèse de doctorat et quelques années à l'Institut Français du Pétrole, **Jean-Pierre Tshibangu** est actuellement Professeur et chef du service de Génie Minier à la Faculté Polytechnique de Mons. Il est notamment à la tête des sondages de recherche dans le Cran aux Iguanodons de Bernissart et est également impliqué dans les études de stabilité de la Cathédrale de Tournai.

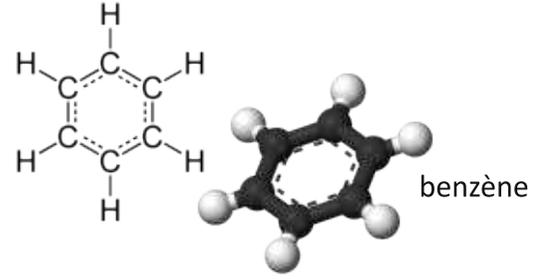
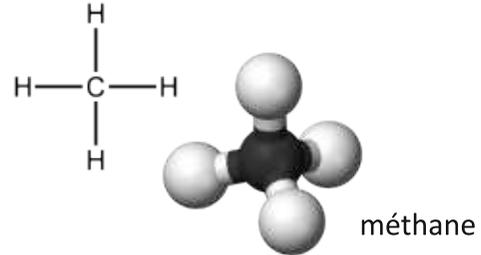
Au sommaire

Pétrole, huile de pierre	5
La genèse du pétrole	6
Le piégeage des hydrocarbures	7
La filière pétrolière	8
Combien de pétrole reste-t-il ?	15
Défis technologiques	16
Et à Mons, que fait-on ?	20
Le pétrole en chiffres	21
Le gaz carbonique	22
CO₂ et réchauffement climatique	23
Stockage naturel du carbone	24
Et le pétrole dans tout ça ?	25
Capter, transporter et stocker le CO₂ ?	26
Captage et transport du CO₂	27
Stockage géologique du CO₂	28
Le CO₂ en chiffres	32
Glossaire	34
Références	35

Pétrole, huile de pierre

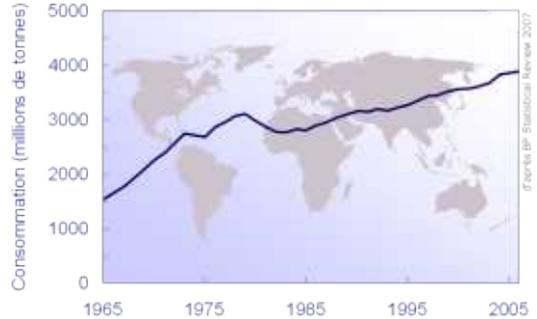
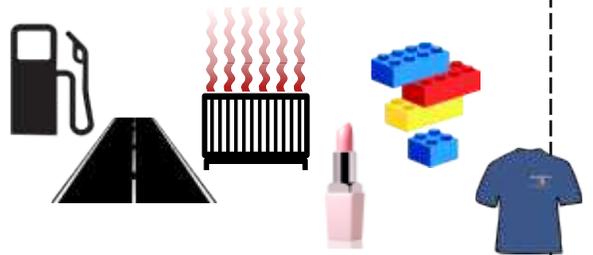
Le pétrole est constitué d'une multitude d'*hydrocarbures**, **assemblages** d'atomes de carbone (C) et d'hydrogène (H). La **longueur** d'une telle chaîne définit son **état physique** (gaz, liquide ou solide). Par exemple :

Méthane	CH ₄	Gaz
Benzène	C ₆ H ₆	Liquide
Paraffine	C ₂₅ H ₅₂	Solide



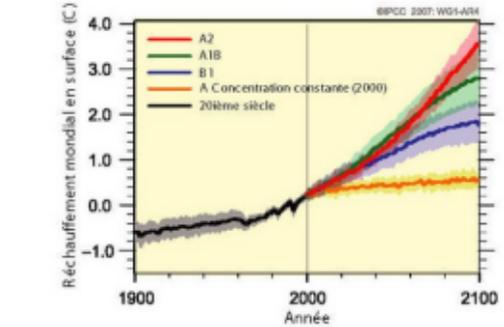
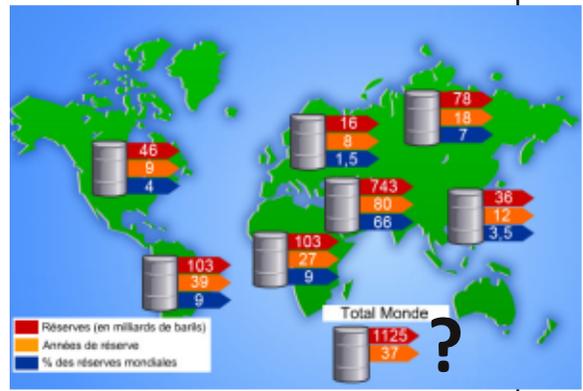
Pourquoi parler de pétrole aujourd'hui ?

Très grande importance dans notre vie quotidienne : carburant, bitume, combustible de chauffage, cosmétiques, matières plastiques et textiles synthétiques, etc.



Consommation mondiale en augmentation : la demande pourrait atteindre 6 milliards de tonnes par an d'ici 2030.

Ressources géologiques limitées : nos réserves finiront par s'épuiser (quand ?)



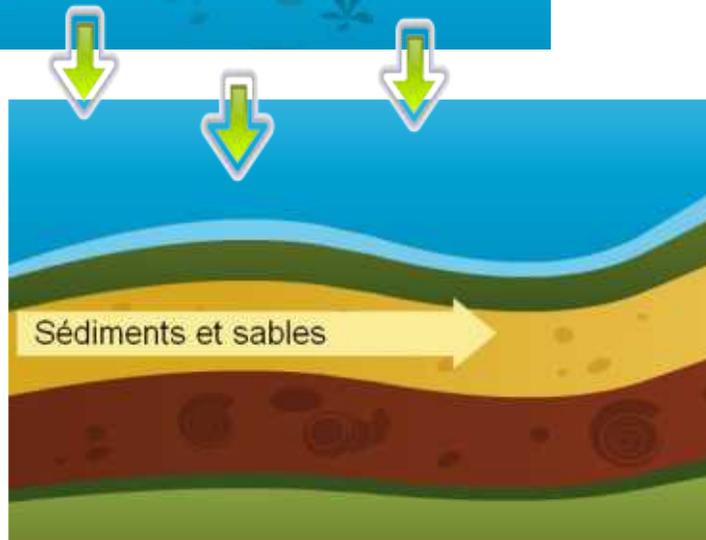
Contribution aux émissions de CO₂ : sa combustion participe au réchauffement de notre planète.

* les termes en italique identifiés par cette couleur sont repris dans le glossaire en fin de dossier

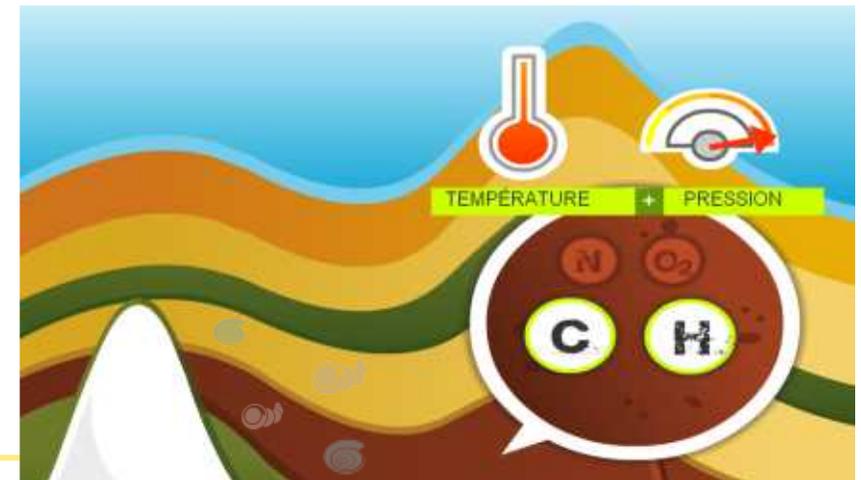
La genèse du pétrole



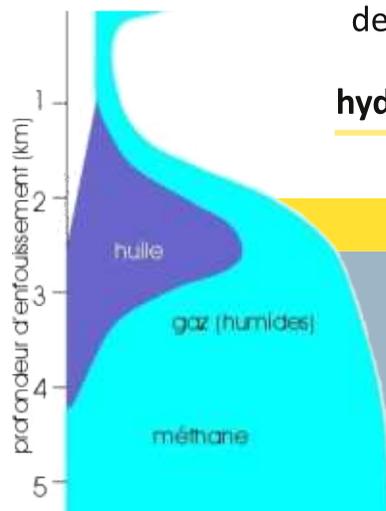
Dans des eaux pauvres en oxygène, des résidus d'**anciens organismes vivants**, composés de **carbone**, d'**hydrogène**, d'**azote** et d'**oxygène**, coulent jusqu'au fond d'une zone d'eau profonde et **se mélangent** aux sédiments minéraux. Sous l'action de micro-organismes **anaérobies**, ils se transforment en assemblages de produits carbonés, le **kérogène**.



Au bout de **dizaines de millions d'années**, cette couche est **enfouie** sous des tonnes de nouvelles couches de sédiments. Sous leur poids, cette masse est alors entraînée à des profondeurs importantes.



Comme conséquence, une **augmentation** de la **température** et de la **pression** (environ 3 °C et 25 bars tous les 100 m) **élimine l'azote et l'oxygène** et **transforme** le kérogène en **hydrocarbures**, gazeux ou liquides : le gaz naturel et le **pétrole**.

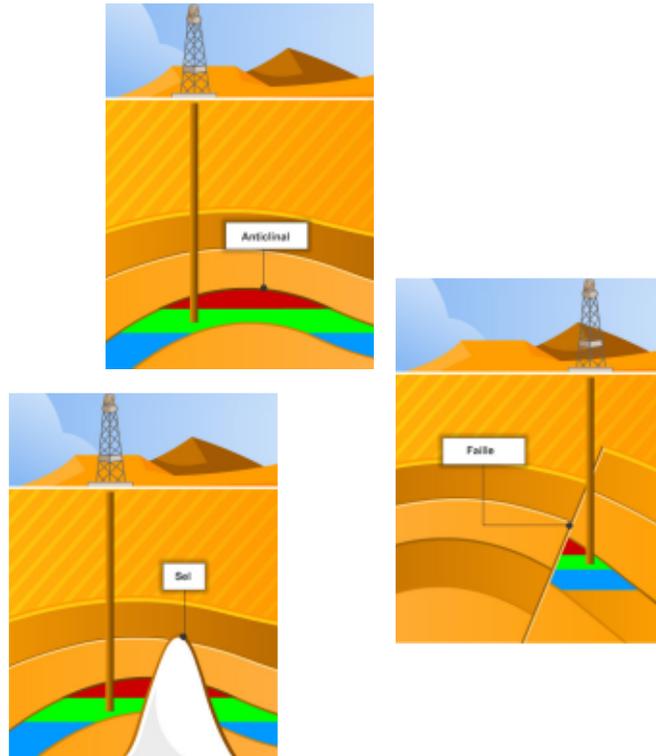
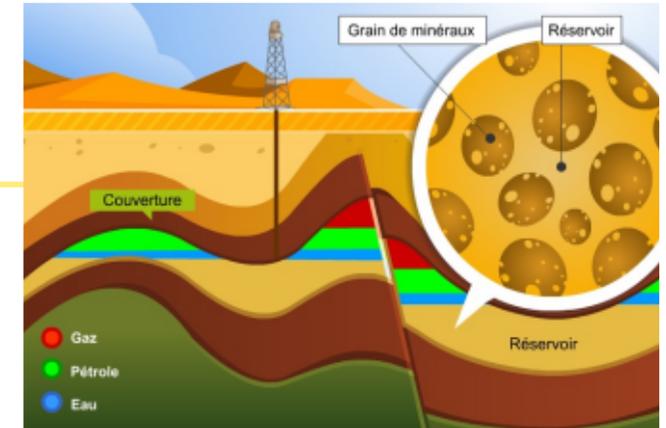


Pétrole ou gaz ?

La transformation commence dès 1500 m de profondeur (environ 60 °C). C'est **entre 2000 et 3000 m** qu'on trouve **le plus d'huile**. On appelle **fenêtre à huile** cette fourchette de profondeur où se forme le pétrole. A partir de 2500 m, la production de gaz s'accélère et devient importante. A **3500 m**, on ne produit **plus d'huile, mais beaucoup de gaz**.

Le piégeage des hydrocarbures

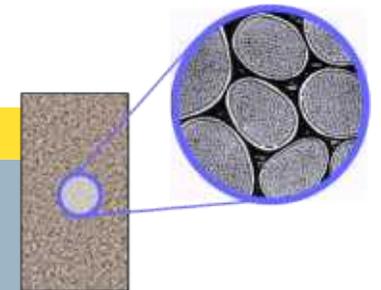
Moins denses que la *roche-mère*, les hydrocarbures **migrent vers la surface** jusqu'à rencontrer une roche imperméable. Ils vont alors s'accumuler dans une **couche poreuse** : la **roche-réservoir**, qui ressemble à une **gigantesque éponge** imbibée de liquides et de gaz.



Pour que se forme un **gisement exploitable** de pétrole ou de gaz, une quantité suffisante d'hydrocarbures doit s'accumuler dans **un volume fermé** important, piégée par des déformations des couches rocheuses. Il existe différents types de **pièges** : **par anticlinal**, contre **dôme de sel** ou contre **faille**.

Un peu de « reservoir engineering »...

Le chemin du pétrole et du gaz naturel vers la surface dépend des **propriétés de la roche** : la **porosité** (sa capacité à contenir un fluide), la **perméabilité** (sa capacité à se laisser traverser) et le degré de **saturation**. La **viscosité** du fluide (sa résistance à l'écoulement) entre également en jeu.



La filière pétrolière s'organise en **5 phases** :

Exploration La localisation précise d'un gisement s'appuie sur l'étude de **clichés aériens ou satellites**, une récolte d'**échantillons** par un géologue, une **échographie du sous-sol** par les méthodes géophysiques (ex.: ondes sismiques) et sa **reconstitution en images de synthèse**.
Si les résultats sont positifs, on effectue alors des **forages exploratoires**.



Exploitation Si le pétrole est au rendez-vous et que la **viabilité économique du projet** est avérée, on effectue des **forages de production** pour exploiter le gisement. Si la pression dans le réservoir est supérieure à la pression atmosphérique, le pétrole sort naturellement du puits (15 à 20% du contenu). Pour aller plus loin, on fait appel à d'autres techniques (récupération secondaire et assistée).

Transport Les **zones de production** étant souvent **éloignées** des plus gros consommateurs, des quantités énormes de pétrole et de gaz sont **transportées** partout dans le monde, **par mer et sur terre**.

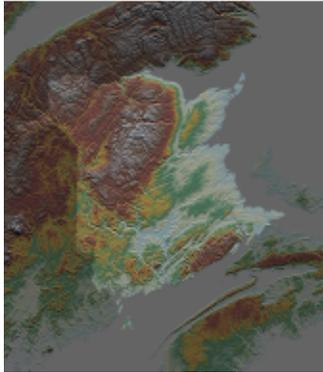


Raffinage Mélange variable de **plusieurs hydrocarbures**, on n'utilise jamais du **pétrole brut** directement. Il **doit être purifié et transformé** en produits bien adaptés à leur utilisation. Ces transformations sont effectuées **dans les raffineries**.

Distribution Pour acheminer ces produits vers les consommateurs, il existe un **réseau très complet** de distribution. Outre le **prix du brut** et les **marges** de raffinage et de distribution, la **majeure partie du prix de vente** des produits pétroliers est composée de **taxes**.

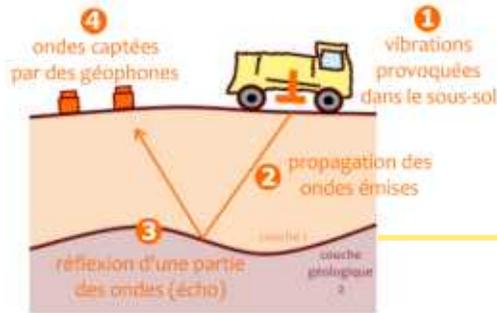
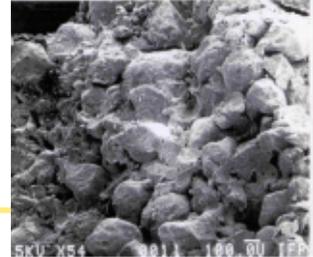


La filière pétrolière (1) : exploration



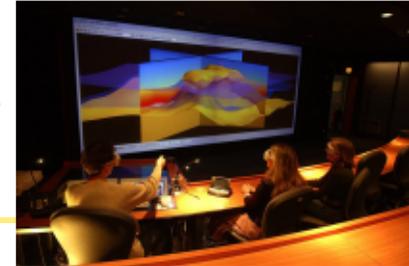
Des **photos aériennes** et des **images satellites** de la surface de la Terre permettent d'identifier des structures (plissements, failles), qui pourraient trahir un contexte favorable à la présence de dômes identiques en profondeur... pièges à pétrole potentiels !

Des géologues récoltent et analysent divers **échantillons** pour connaître la nature des roches (il faut des roches sédimentaires) et leur âge (inutile d'étudier les terrains récents). Par exemple, des argiles solidifiées et noircies, caractéristiques de la roche-mère, ou encore la trace d'affleurement de cette dernière, parvenue à l'air libre à la suite de mouvements de terrain.



Ces premiers indices ne suffisent généralement pas à conclure à la présence d'un gisement. Des études géophysiques sont menées pour obtenir une image 3D du sous-sol. Par exemple, des **camions vibreurs** génèrent des mini-tremblements de terre en frappant le sol. L'étude de ces ondes sismiques renseigne les géologues sur les propriétés physiques des roches traversées. En mer, pas de camion... mais des bateaux qui sont équipés d'un **air-gun**.

Le sous-sol est reconstitué en **images de synthèse** qui permettent de visualiser la nature des roches et leur agencement dans le terrain, afin d'identifier d'éventuels pièges à hydrocarbures.



Un **forage exploratoire** est effectué pour vérifier la présence d'un gisement d'hydrocarbures. Malgré tous les travaux préparatoires, six fois sur sept le trou aura été creusé en pure perte !

Où trouver du pétrole ?

Il existe des grandes provinces pétrolières et gazières à travers le monde. Ainsi, le **Moyent-Orient** détient plus de **60% des réserves** de brut prouvées.



Un forage est réalisé grâce à une « perceuse géante » qui se présente sous la forme d'une haute structure d'acier : le **derrick**.

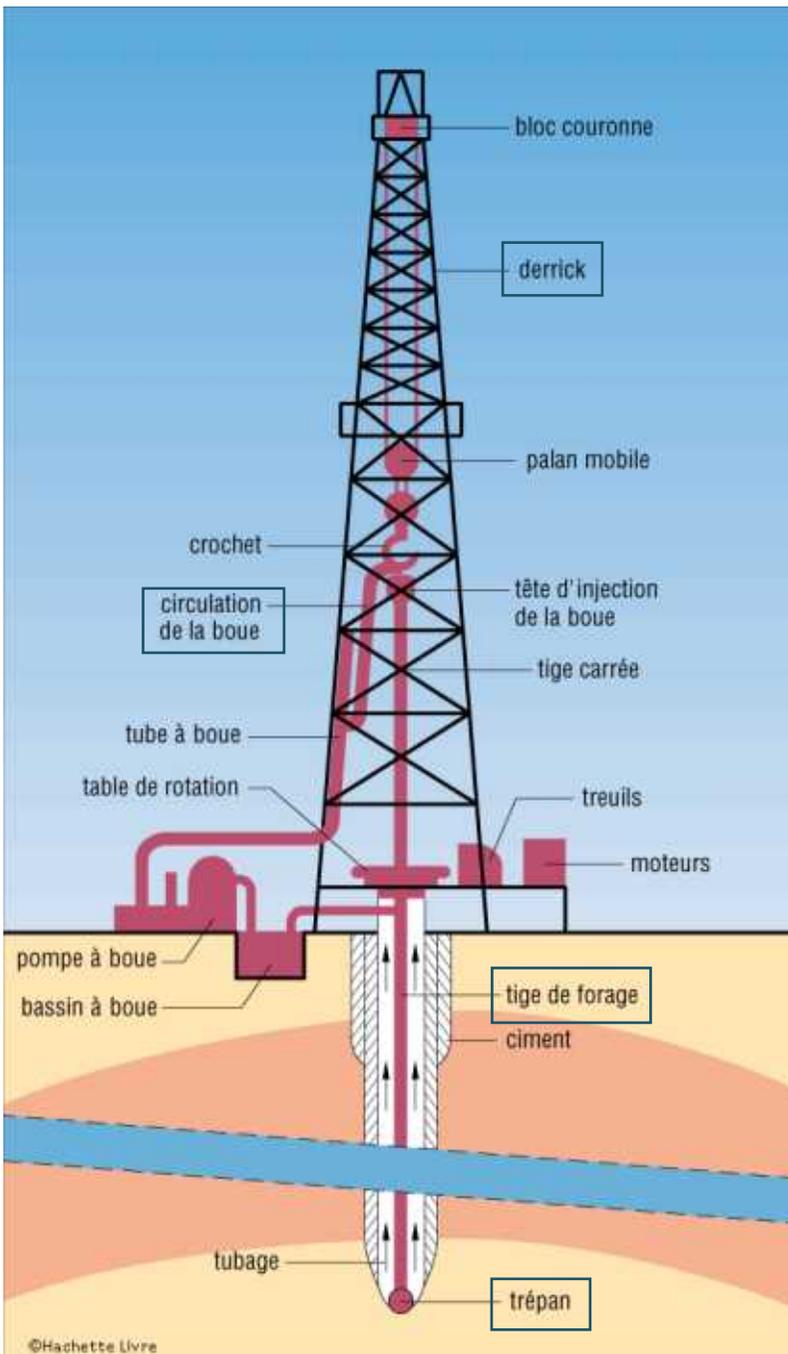
Il sert à introduire verticalement un ensemble de tubes métalliques, vissés bout à bout, formant le **train de tiges** de forage. Cet ensemble s'achève par une « mèche géante » : le **trépan**.



Par les tiges creuses, on injecte une **boue de forage**, à base d'eau, d'huile ou de polymères. Son rôle est de refroidir le trépan, stabiliser les parois du puits et acheminer les déblais à la surface.

Trépan(s)

Il y a 3 types d'outils principaux : les **tricônes** ou outils à molettes, destinés aux roches dures (ils agissent par fragmentation), les outils équipés de **PDC** (pastilles de diamants polycristallins synthétiques), qui sont bien adaptés pour les roches plutôt tendres (mécanisme de coupe) et les outils aux **diamants imprégnés**, qui conviennent spécialement pour les roches dures et abrasives. Ces outils détruisent la roche en petits morceaux, les **cuttings**.

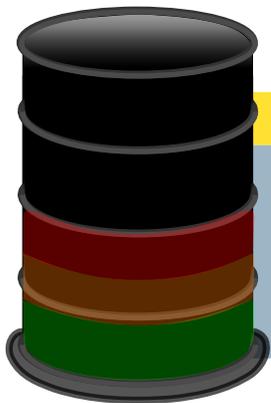


La filière pétrolière (2) : exploitation



Un gisement d'hydrocarbures peut être exploité *on-shore* - **sur terre** - ou *off-shore* - **en pleine mer**. Outre les plate-formes fixes, les moyens ont bien évolué : auto-élévatrices, semi-submersibles, bouées (SPAR) et navires à positionnement dynamique (FPSO).

Initialement, on effectuait seulement des **forages verticaux**. Aujourd'hui, ils peuvent aussi être **inclinés, horizontaux** ou à **grand déport**. Alors que 3 à 5 kilomètres est une profondeur courante en forage vertical... on va jusqu'à 10 kilomètres de la cible en forage horizontal !



Récupération

Pour **100 l de pétrole** dans un réservoir, on est capable d'en extraire **30 à 35 l en moyenne**. Les **techniques primaires** (déplétion naturelle et pompage) ne permettent de récupérer que **15 à 20 %**. Pour en extraire davantage, il faut faire appel à la **récupération secondaire** (injection d'eau ou de gaz) - **30 à 35 %** - voire à des techniques plus complexes de **récupération assistée** (souvent injection de vapeur) - **40 à 50 %**.

La filière pétrolière (3) : transport

Selon le lieu de production, le pétrole est acheminé vers les raffineries **par voie maritime (bateaux) ou par voie terrestre (oléoducs)**. Le coût du transport représente **5 à 10 % de la valeur ajoutée**.



La **moitié** du pétrole va **du Moyen-Orient** vers le Japon, les États-Unis ou l'Europe.

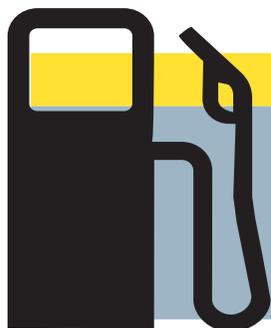
Et le gaz ?

Pour le gaz, on privilégie le transport terrestre ou sous-marin par gazoducs. Mais dans certains cas, des limitations techniques ou un coût trop élevé ont conduit à la mise en œuvre d'une méthode de transport par bateau, basée sur la liquéfaction du gaz (GNL).





Un **réseau de distribution** achemine enfin ces produits jusqu'au consommateur. Les gros utilisateurs, des industriels, sont livrés directement. Pour les autres, la distribution passe par des étapes intermédiaires, comme les dépôts de produits pétroliers.



Le prix des hydrocarbures

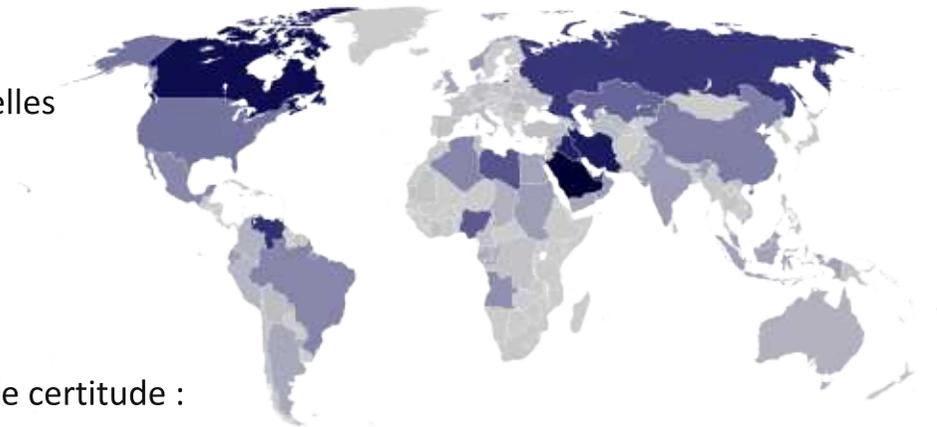
Le prix de vente à la pompe est la **somme du prix du brut** (prix du jour), **des marges de raffinage et de distribution et de taxes**. Il varie selon les produits (essence, diesel, fuel domestique), mais également la fiscalité du pays consommateur. Cela explique que le prix des carburants à la pompe soit **beaucoup plus élevé que le cours du baril de pétrole**.

Combien de pétrole reste-t-il ?

« Depuis quarante ans, la durée de vie des réserves de brut est estimée à... quarante ans ! »

C'est une question difficile, car **différents facteurs interviennent** :

- **géologiques** (ressource non-renouvelable, possibilité de nouvelles découvertes, incertitude sur l'estimation)
- **techniques** (amélioration de la récupération)
- **économiques** (rythmes de consommation, prix acceptables)



On distingue **différentes classes de réserves**, selon le niveau de certitude :



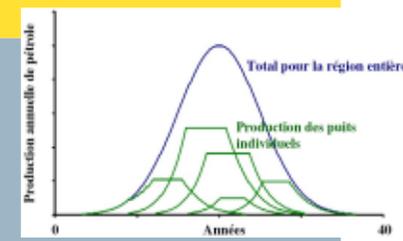
Les réserves **mesurées** proviennent d'un échantillonnage détaillé (affleurement, tranchées, travaux, trous de forages).

Les réserves **indiquées** sont issues de mesures, échantillons et données de production. On effectue aussi des projections pour une distance raisonnable.

Les réserves **inférées** se basent sur le caractère géologique de l'accumulation. Elles reposent sur peu d'échantillons ou de mesures, voire pas du tout.

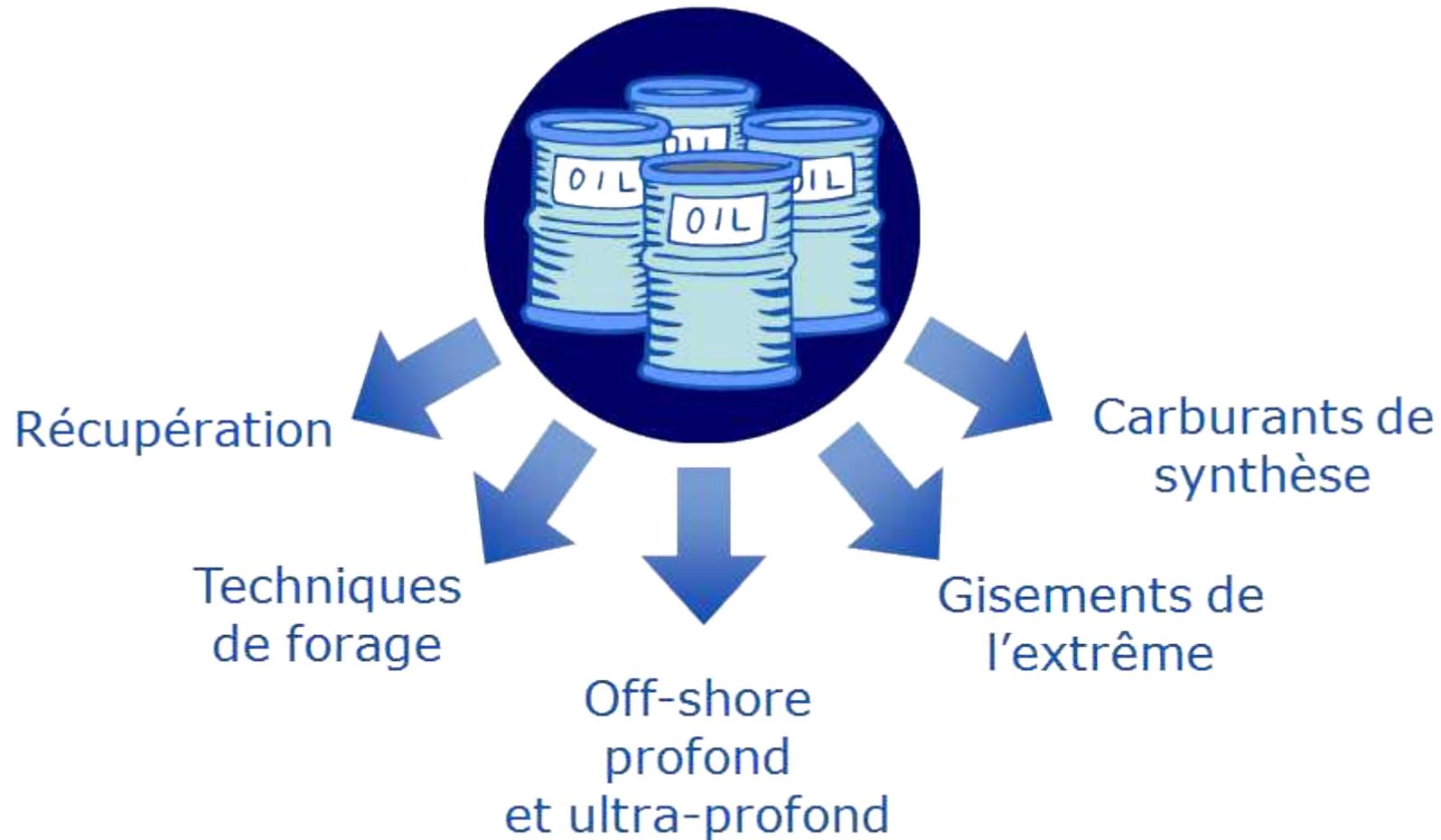
Le pic de production

Pour des raisons géologiques et techniques, toute production de pétrole suit le schéma général suivant : la production augmente après les premiers forages, atteint un maximum lorsque environ la moitié des réserves extractibles ont été produites, puis diminue progressivement jusqu'à zéro. De nombreux experts attendent un pic pétrolier mondial d'ici 2020. Mais ce n'est qu'après l'avoir dépassé que nous le saurons avec certitude...



Défis technologiques (1)

Avec les techniques classiques, pas moins des **deux tiers du pétrole découvert restent encore piégés sous terre**. Comme les hydrocarbures ne sont pas inépuisables, autant vider au mieux les réservoirs. Meilleurs forages, nouveaux dispositifs de pompage, gisement difficiles d'accès... de nombreux **défis technologiques** que les pétroliers cherchent à relever !

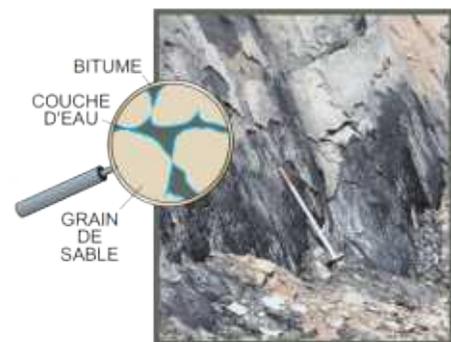


Réserves non-conventionnelles

Les pétroles non conventionnels ont été délaissés jusqu'à aujourd'hui, car ils sont — entre autres — très coûteux à exploiter. Ils pourraient prendre la relève lorsque les carburants conventionnels ne seront plus économiquement viables. Parmi ceux-ci, on retrouve les **schistes bitumineux** et les **sables asphaltiques**.



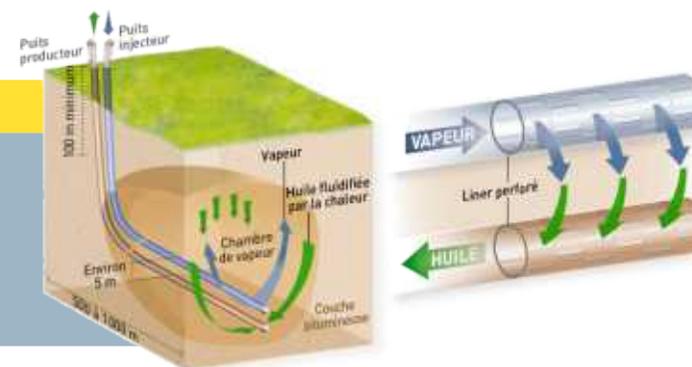
Les schistes bitumineux Il s'agit d'une roche-mère qui n'a pas été soumise à des températures et des profondeurs suffisantes pour terminer la genèse du pétrole. On en retrouve les plus grosses accumulations aux Etats-Unis et au Brésil. Leur exploitation se fait par des **mines à ciel ouvert**, comme du minerai ou du charbon. Le kérogène que ces schistes contiennent peut ensuite être transformé en huile grâce à un procédé chimique : la pyrolyse (chauffage à 500°C dans une enceinte privée d'air).



Les sables asphaltiques Lors de leur genèse, ils auraient subi une dégradation par oxydation ou par des bactéries. Plus denses que l'eau, ils sont difficiles à récupérer du fait de leur viscosité. Plus de 90% des gisements sont trop profonds pour être exploités par des techniques minières, il faut alors recourir à des procédés d'**extraction par forage et injection de vapeur**.

La récupération assistée par injection de vapeur

L'injection de vapeur augmente la température du bitume, entraînant une diminution de sa viscosité. Ainsi, le bitume est fluidifié et peut être facilement pompé.

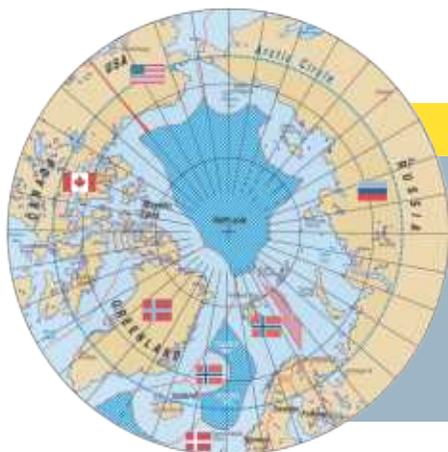
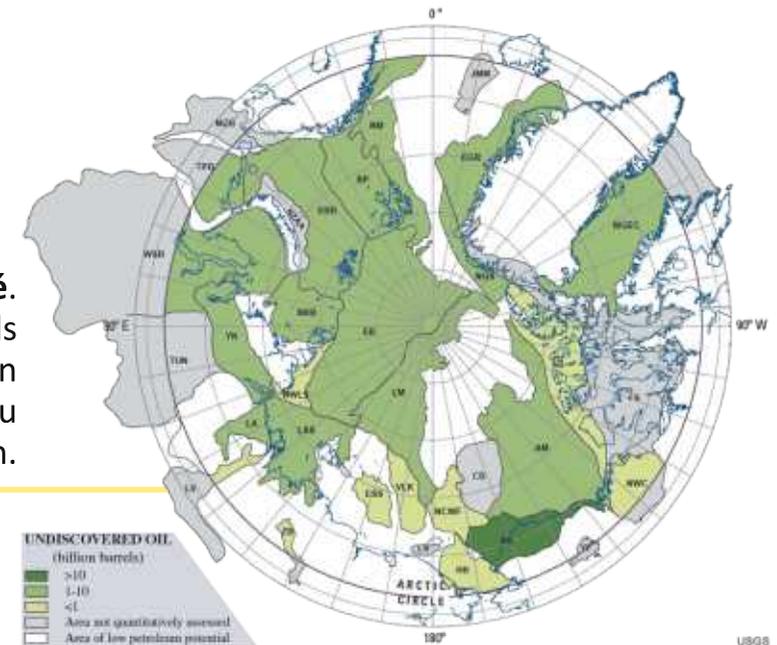


Zones arctiques

Depuis des décennies, on a identifié cette région du globe comme **très riche en hydrocarbures**. Certains gisements y sont déjà exploités et, avec la **fonte progressive de la banquise d'été due au changement climatique**, l'extraction des richesses de l'Arctique devient « physiquement » possible à plus grande échelle. Mais la mise en production de gisements dans la région exige des **coûts d'investissement très élevés** liés aux techniques à mettre en oeuvre pour extraire, produire et acheminer le brut et le gaz vers les zones de consommation. La rentabilité de ce type d'exploitation est donc conditionnée à un prix élevé du baril de pétrole.



Jusqu'à présent, **seulement 10% de la région a été exploré**. Dans cette zone, on a déjà découvert 20 milliards de barils de pétrole et 8000 milliards de m³ de gaz. En évaluant sur cette base les réserves potentielles de l'Arctique, on estime qu'elles nous permettraient de faire face à **7 ans de pétrole** et **30 ans de gaz** au rythme actuel de consommation.



A qui appartiennent ces réserves ?

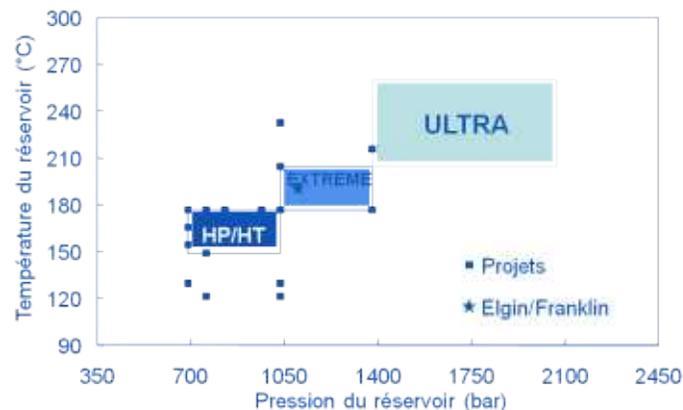
L'Arctique est une zone internationale dont huit pays sont susceptibles de réclamer la souveraineté. Comme tous les océans, il est régi par la Convention des Nations unies sur le droit de la mer, non ratifié par les Etats-Unis. Le texte fixe à 200 milles nautiques (360 km) la zone économique exclusive qu'un Etat côtier contrôle le long de son territoire. Si l'un d'eux revendique des fonds marins situés au-delà, il doit démontrer (profils géologiques à l'appui) que ces derniers sont une prolongation de son propre plateau continental...

Gisements très enfouis

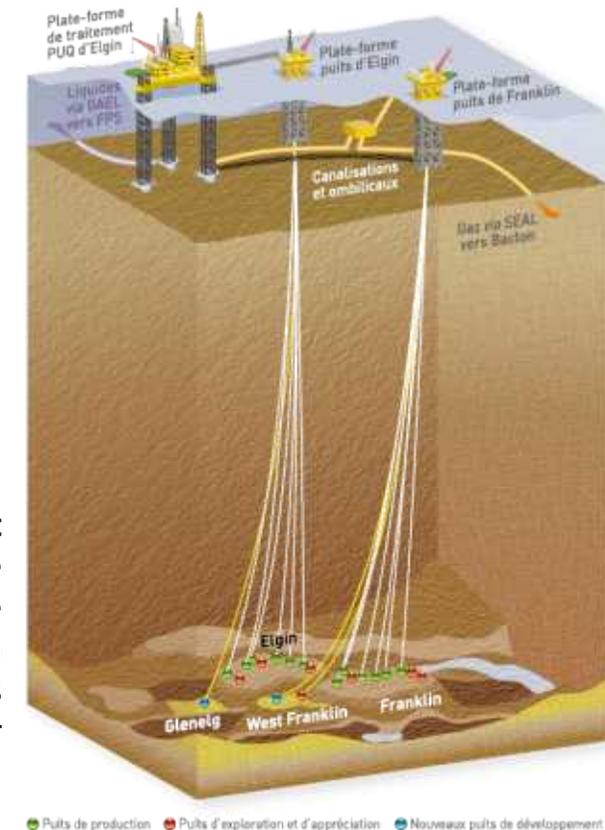


La profondeur des champs de pétrole actuellement exploités ne dépasse pas 5600 mètres. Selon de nombreux géologues, **d'autres réservoirs existent à plus grande profondeur**, vers 6000 mètres ou plus, dans des conditions géologiques particulières. Cette localisation entraîne **une pression et une température très élevées**, pour lesquelles les techniques et les outils existants sont inadaptés, voire inopérants.

La température, qui est de l'ordre de 150 °C vers 4500 mètres de profondeur, peut approcher 300 °C au-delà de 6000 mètres. La pression passe d'environ 500 bars à 1000 voire 1500 bars, soit 1500 fois la pression atmosphérique. Dans ces conditions, **les foreurs doivent utiliser un matériel différent**, d'autant qu'aucun des instruments électroniques utilisés pour piloter le forage en temps réel ne résiste à plus de 180 °C. Quant à la technique utilisée pour réaliser une « échographie » du sous-sol, l'image qu'elle fournit est dégradée à cause de la profondeur : **on n'a plus de représentation fidèle de ce qui se trouve dans le sous-sol**. Et pour corser le tout, **les hydrocarbures renferment des gaz corrosifs** (sulfure d'hydrogène H₂S et dioxyde de carbone CO₂).



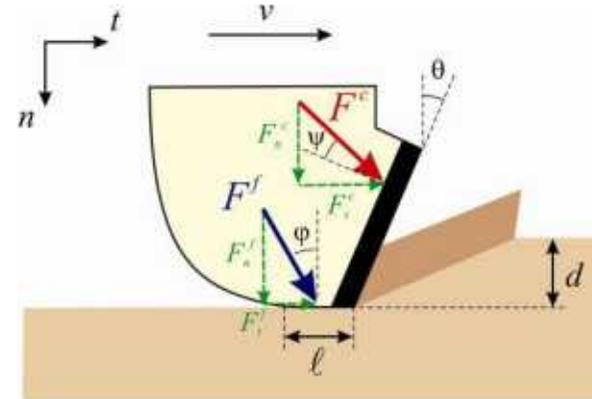
Malgré tout, le défi a été relevé ! Le meilleur exemple est celui des **gisements jumeaux Elgin et Franklin**, en mer du Nord britannique. Après dix ans de recherche & développement, 11 puits de production ont été forés en 2001. Ce développement, le plus grand projet HP/HT (haute pression/haute température, dans ce cas-ci 1100 bar et 190 °C) du monde, s'est poursuivi en 2006, avec le forage d'un puits dévié (7300 mètres) à partir de la plate-forme d'Elgin vers le gisement voisin de Glenelg. Le succès est à nouveau au rendez-vous en 2007, avec le forage du premier puits additionnel dans un réservoir HP/HT, destiné à poursuivre le développement autour du réservoir de Franklin.



La recherche à la Polytech Mons s'articule autour de deux grands axes :

Les mécanismes de destructibilité des roches

Il s'agit de comprendre le **fonctionnement des outils** de forage pour parvenir à une **amélioration de leurs performances**.



Le comportement des roches à grande profondeur

Ces études sont basées sur des **dispositifs de laboratoire** capables de reproduire les conditions de contrainte, de **pression de pore** et de température, en parallèle avec la **modélisation mathématique** du comportement de ces roches. Les applications concernent tant la **stabilité des puits** (géomécanique du forage) que l'**estimation des réserves**.



Dispositifs de laboratoire

Le laboratoire de Génie Minier de la FPMs dispose d'un système de compression polyaxiale qui permet l'étude du comportement de la roche sous des contraintes variant selon les trois directions de l'espace et pouvant atteindre 500 MPa dans chaque direction. Un système de compression triaxiale est également en cours de développement pour étudier le comportement mécanique des roches à grande profondeur, ce banc d'essai pouvant reproduire les mêmes conditions en termes de contraintes, pression de pore et température.

Le pétrole en chiffres

1960

c'est l'année de création de l'OPEP (Organisation des Pays Exportateurs de Pétrole)

159 litres

c'est la capacité d'un baril, utilisée comme unité de mesure pour le pétrole brut et ses dérivés

1 à 1,2 tonne

c'est la quantité de pétrole qu'une tonne de plastique recyclé permet d'économiser

60%

des réserves de brut prouvées sont détenues par le Moyen-Orient

86,4

millions de barils ont été produits par jour en 2008

800 à 900

tonnes de bitume sont nécessaires pour aménager 1 kilomètre d'autoroute

35%

c'est la part du pétrole qu'on récupère actuellement dans un gisement

85,7 millions

c'est la demande mondiale en 2008 (en barils/jour)

2

tonnes de sable bitumineux sont requises pour produire un baril de pétrole

0,75 €

c'est la part des taxes européennes pour un prix de vente à la pompe de 1,00 €

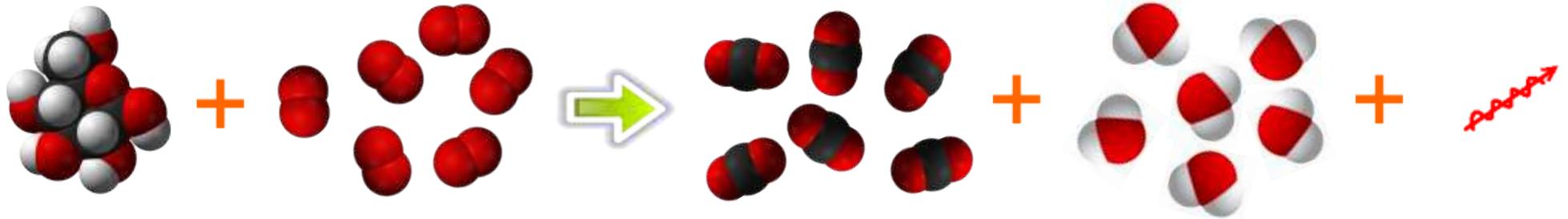
2 200 m

c'est le record de profondeur d'eau pour un forage off-shore

Le dioxyde de carbone, ou gaz carbonique, est un **composé chimique** constitué d'un **atome de carbone** et de **deux atomes d'oxygène** (CO₂). C'est un gaz inodore, incolore et soluble dans l'eau; on en retrouve dans les boissons gazeuses, dans les extincteurs, comme réfrigérant ou comme agent propulseur.

D'où vient-il ?

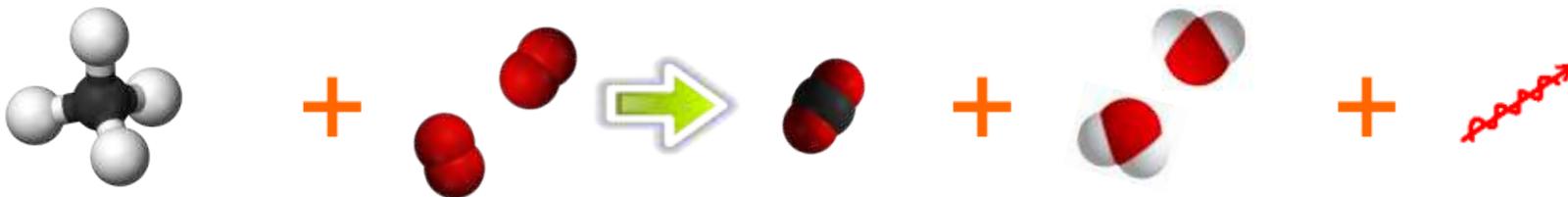
Respiration des animaux et des végétaux $C_6H_{12}O_6$ (glucose) + 6 O₂ → 6 CO₂ + 6 H₂O + énergie



Fermentation aérobie $C_6H_{12}O_6$ (glucose) → 2 C₂H₅OH (alcool) + 2 CO₂



Combustion CH_4 (méthane) + 2 O₂ → CO₂ + 2 H₂O + énergie

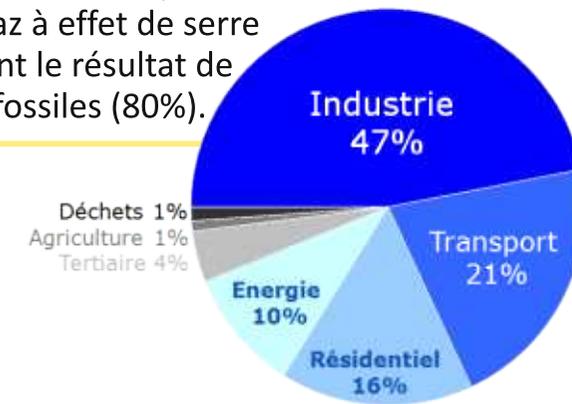


CO₂ et réchauffement climatique

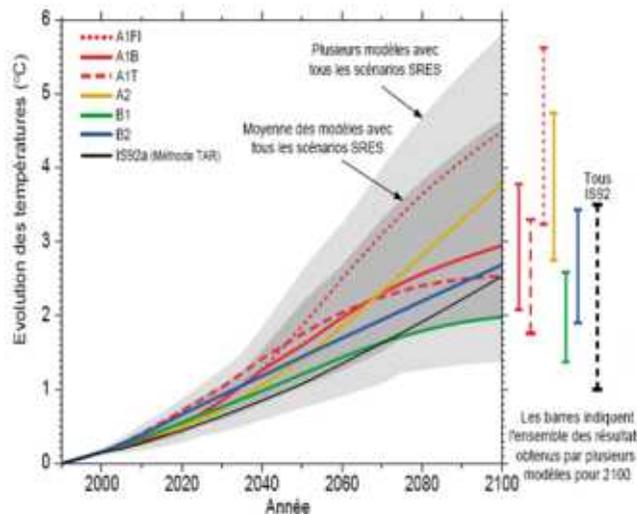


La présence de certains gaz (vapeur d'eau, CO₂, méthane...) dans l'atmosphère entraîne un effet de serre naturel qui rend la vie possible sur Terre. Cet effet de serre est propice à la vie, puisque sans lui, la Terre ne serait qu'une boule de glace. Le problème est qu'il existe un risque de déséquilibre si la concentration en gaz à effet de serre venait à augmenter.

Or, les émissions de CO₂ d'origine *anthropique* (pas naturelle) sont en forte croissance. En Région Wallonne, près de 90% des gaz à effet de serre proviennent des émissions de CO₂, dont la plupart sont le résultat de la combustion d'énergies fossiles (80%).



Ces émissions anthropiques ont pour conséquence une augmentation de la température moyenne de la Terre de 0,6 ± 0,2 °C sur les 100 dernières années. Et la plupart des scénarii indiquent que ce réchauffement climatique va s'accroître au cours des décennies à venir, accompagné d'une élévation du niveau de la mer de plusieurs dizaines de centimètres.



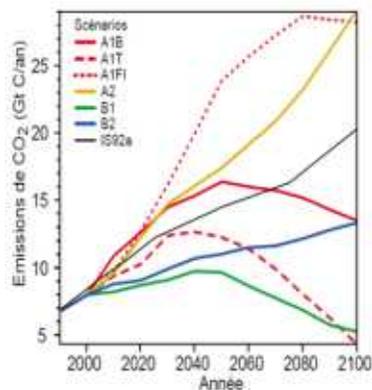
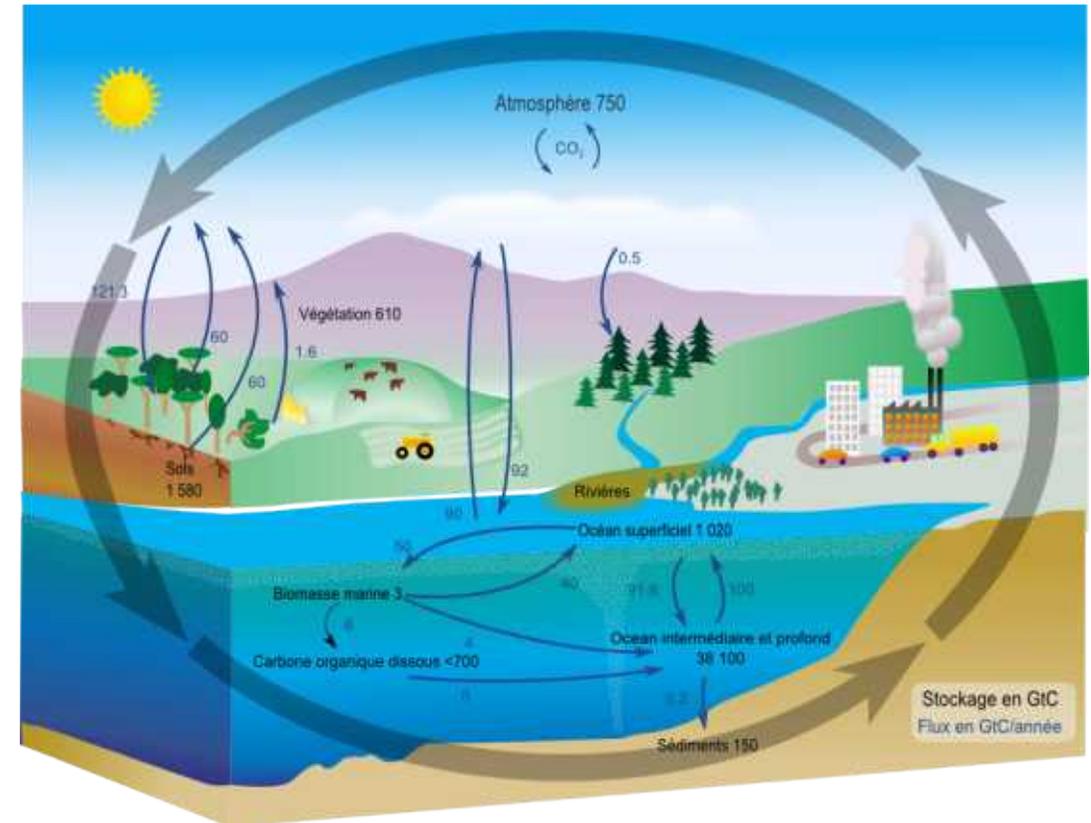
Réduire nos émissions : le protocole de Kyoto

Il s'agit d'un engagement (qui arrive à échéance fin 2012) de pays industrialisés à réduire leurs émissions de CO₂ en remplissant des objectifs globaux, régionaux et nationaux. Pour faciliter leur réalisation, ces pays ont la possibilité de recourir à des mécanismes dits « flexibles », basés sur la mise sur le marché de quotas d'émission (le nombre de tonnes de CO₂ que chaque entreprise ou industrie peut émettre). Ces crédits carbone font alors partie d'un marché et peuvent y être échangés librement.

Et pourtant, la nature nous aide...

- les écosystèmes stockent plus de CO₂ qu'ils n'en émettent
- la moitié des émissions de CO₂ est absorbée par les puits naturels

Réservoirs	Stocks de carbone (Gt)
OCEAN	40 000 dont
Océan superficiel	1 020
Océan intermédiaire et profond	38 100
Biomasse marine	3
Carbone organique dissous	700
CONTINENTS	2 190 dont
Végétation	610
Sols et détritiques organiques	1 580
ATMOSPHERE	750



Le saviez-vous ?

Les gaz à effet de serre résident environ 150 à 200 ans dans l'atmosphère. Ainsi, les émissions du XIX^e siècle nous influencent aujourd'hui. Quant à nos émissions actuelles, elles auront un impact sur les générations à venir...

Et le pétrole dans tout ça ?

Pour faire face à la demande d'énergie sans cesse en augmentation, le pétrole a été LA solution polyvalente de ces dernières décennies. Mais il présente de nombreux **inconvenients**...

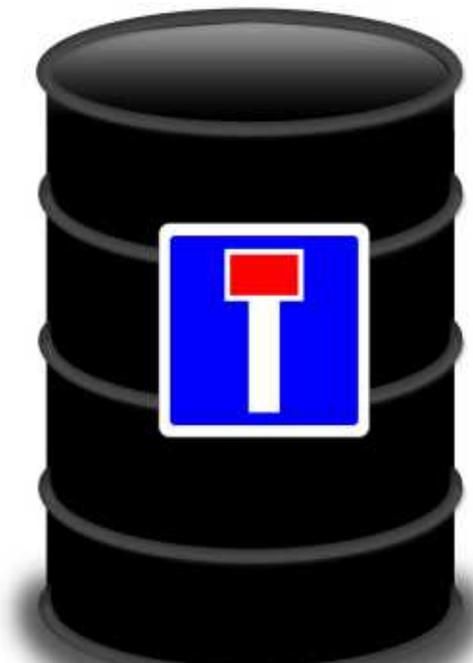
La production et le raffinage plafonnent par **manque d'investissement**

Les ressources sont limitées

Les conflits géopolitiques sont une menace

Sa combustion entraîne des **émissions de CO₂** et participe donc au **réchauffement climatique**

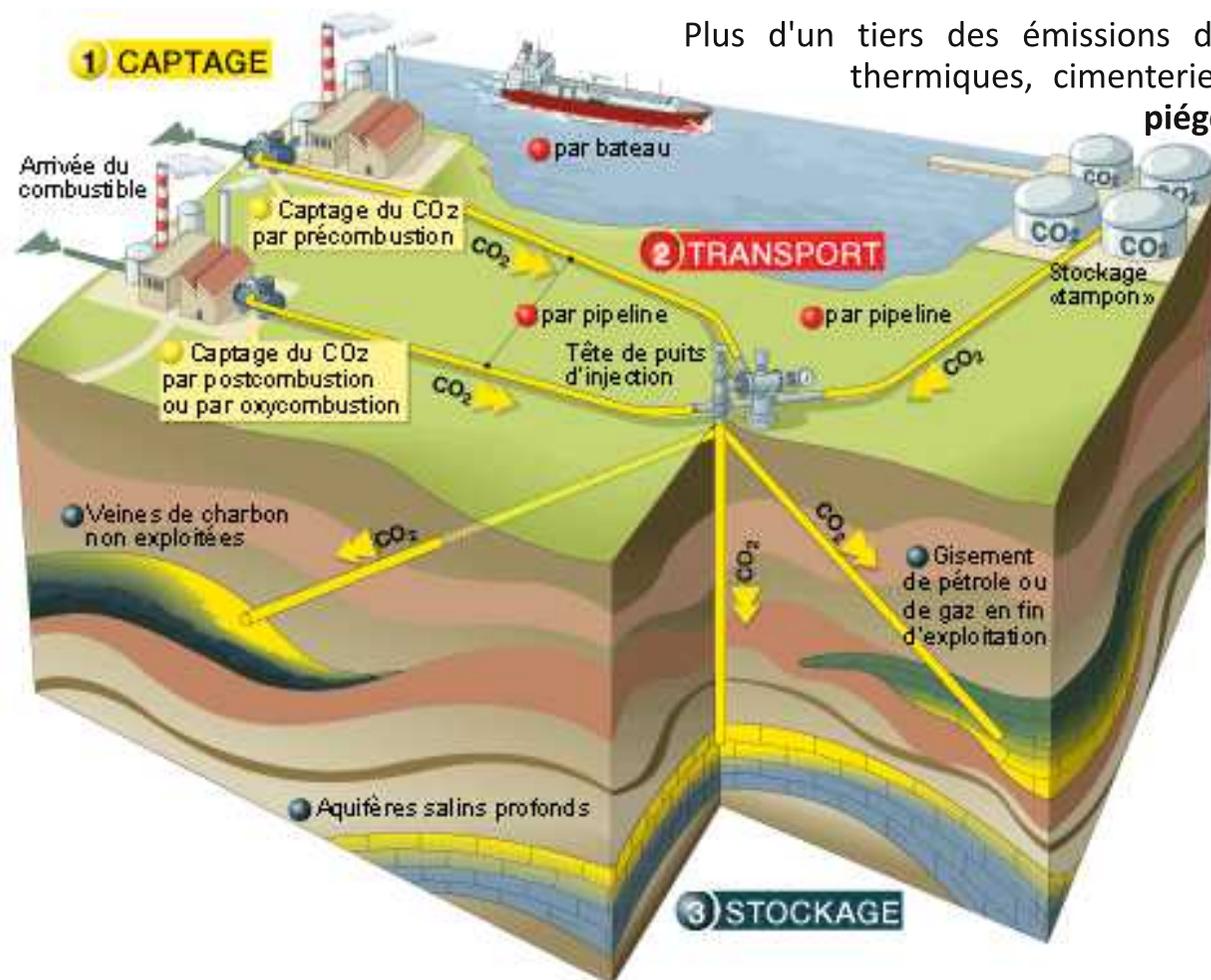
Il n'existe **pas d'alternative massive** au pétrole



Quelles sont les solutions ?

- réduire la consommation d'énergie
- diversifier les sources
- développer des énergies à faible contenu en carbone
- modifier les comportements
- émettre moins de CO₂ en maîtrisant les rejets industriels et des transports
- **optimiser le pétrole** pour continuer d'assurer pendant un certain temps sa disponibilité
- **capter, transporter et stocker le CO₂ émis**

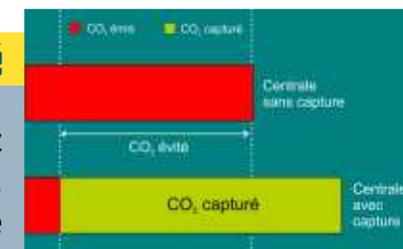
Capter, transporter et stocker le CO₂ ?



Plus d'un tiers des émissions de CO₂ proviennent de sources concentrées (centrales thermiques, cimenteries, raffineries...). Une solution à grande échelle est de **piéger ce CO₂, le transporter vers un site géologique et l'y stocker**. Il ne s'agit que d'une solution de transition (quelques dizaines à centaines d'années).

CO₂ stocké ≠ CO₂ évité

Le captage du CO₂ représente une dépense supplémentaire d'énergie, entraînant une nouvelle émission de gaz carbonique. La quantité de CO₂ évité est ainsi toujours inférieure à la quantité de CO₂ effectivement capté. Pour évaluer les performances, il faut donc comparer les rejets dans l'atmosphère d'une centrale sans captage et d'une centrale avec captage.

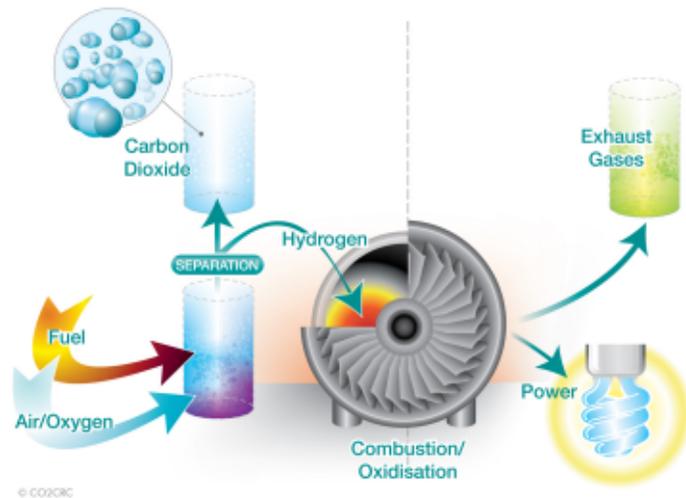
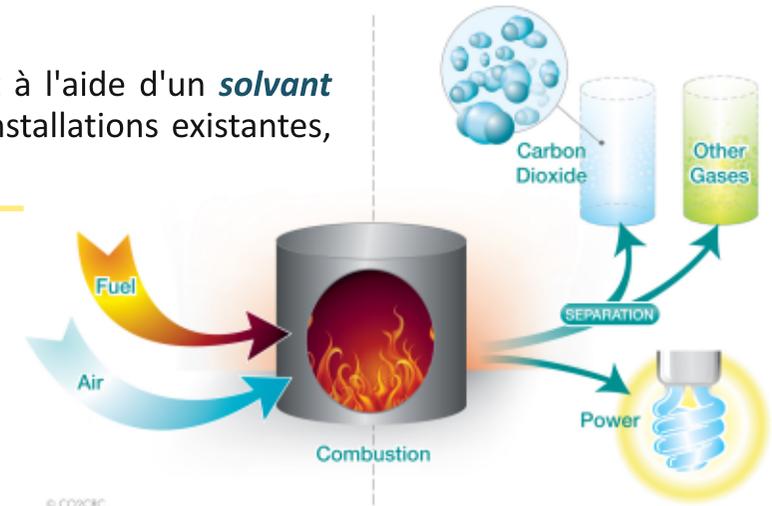


Le captage

- Il s'agit de **séparer le CO₂ des autres constituants** des fumées de combustion
- Cela représente **70% du coût total**
- **3 techniques** sont aujourd'hui disponibles :

Postcombustion On capte le CO₂ dilué dans les fumées de combustion, souvent à l'aide d'un *solvant* chimique liquide pouvant être régénéré. Bien qu'elle puisse être appliquée aux installations existantes, cette voie est à la fois gourmande en énergie et onéreuse.

Oxycombustion On réalise la combustion **en présence d'oxygène O₂ au lieu de l'air** (80% d'azote). Les fumées étant directement très concentrées en CO₂, il est plus facile de le récupérer. Cette technique n'est applicable qu'aux nouvelles installations.

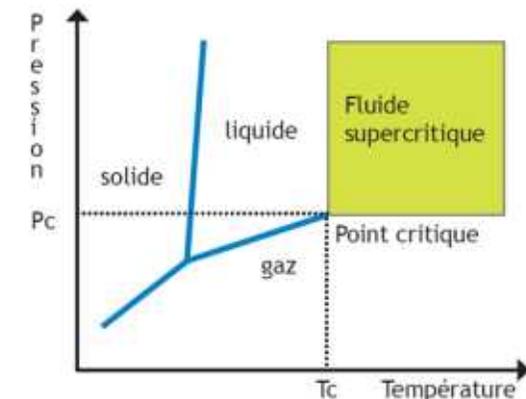


Précombustion On convertit le combustible fossile en gaz de synthèse, mélange de monoxyde de carbone (CO) et d'hydrogène qui sont ensuite séparés par un solvant. L'hydrogène sert alors à la production d'énergie sans émission de CO₂, extrait à la source. Cette technique est déjà utilisée à l'échelle industrielle.

Le transport

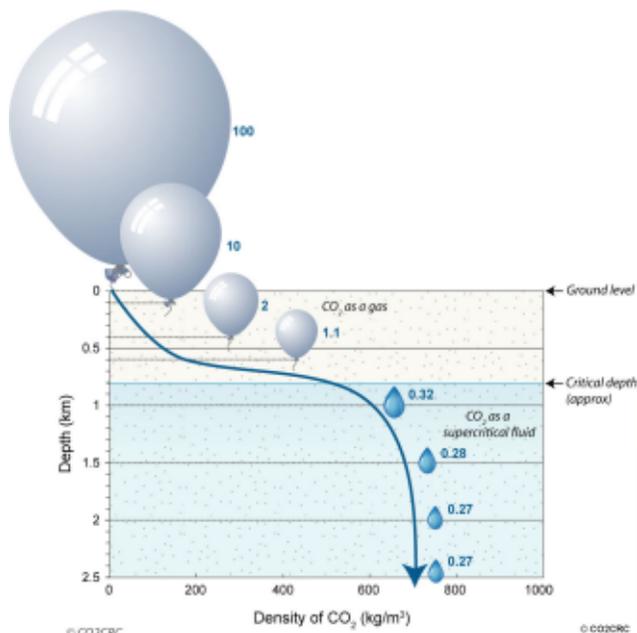
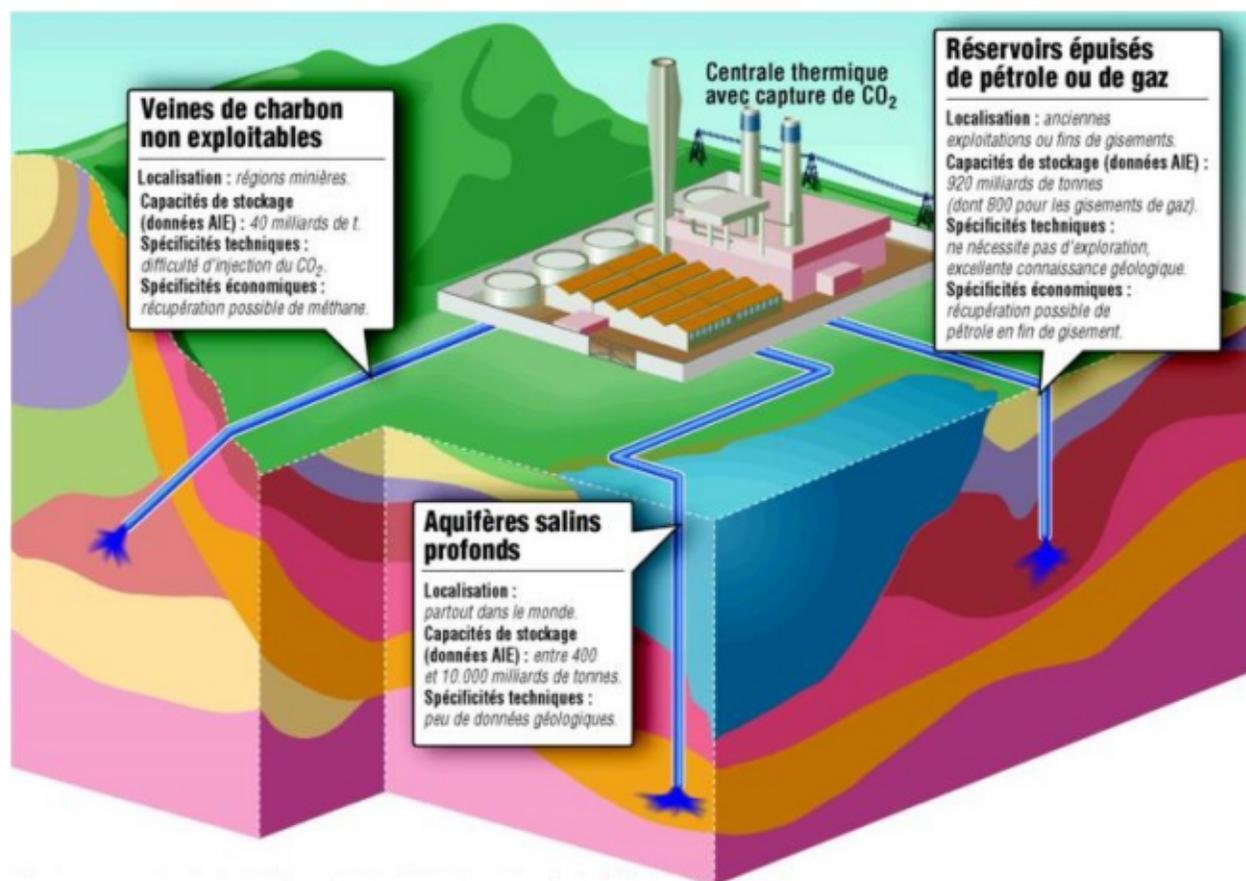
Il faut parfois transporter le CO₂ sur plusieurs centaines de kilomètres. Les techniques de transport des gaz naturels sont applicables au CO₂. Actuellement, il se fait :

- par **bateau** sous forme **liquide**
- par **gazoduc** à l'état **supercritique** (c'est-à-dire proche de l'état liquide)



Une fois capturé et arrivé à bon port, il faut stocker le CO₂ de façon étanche.
Différents types de formations géologiques conviennent, dont les 3 principales sont :

- les **réservoirs de pétrole ou de gaz en fin de vie** (45% des émissions d'ici 2050)
- les **veines de charbon non exploitables** (moins de 2%)
- les **aquifères salins profonds** (20 à 500%).



Le saviez-vous ?

La **profondeur** du stockage (généralement entre 800 et 1000 mètres) est un élément important à prendre en compte. Si elle est supérieure à 1000 mètres, le CO₂ atteint l'état **supercritique**, plus condensé : on peut donc en stocker davantage dans un même espace.

Le stockage en réservoir pétrolier

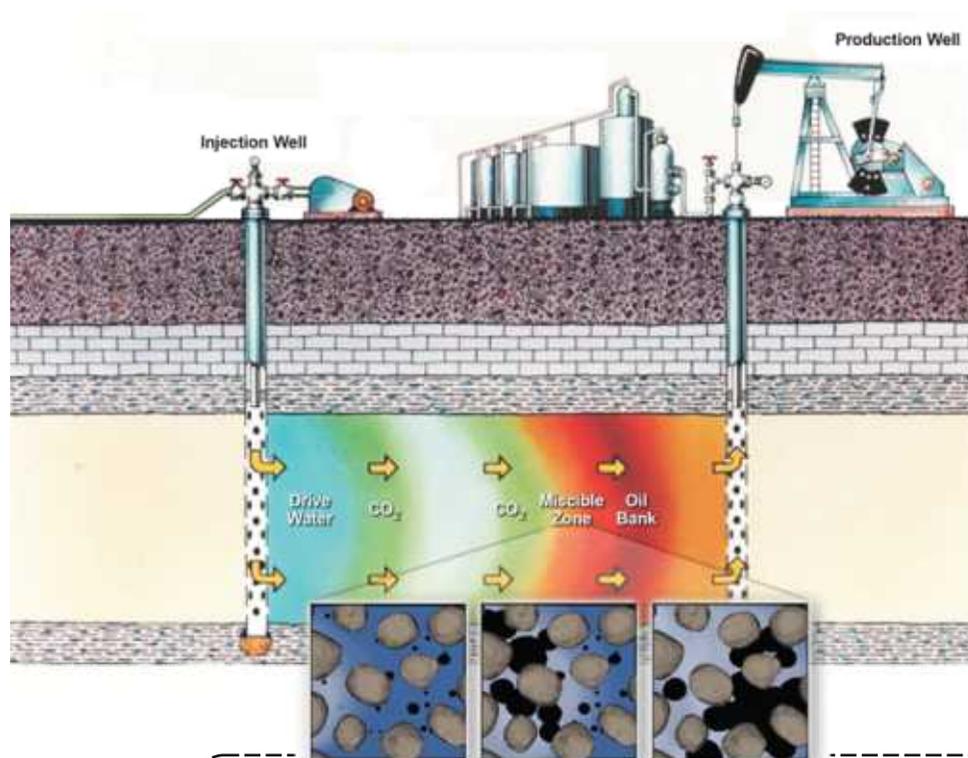
Il s'agit d'injecter le CO₂ dans les réservoirs de pétrole (ou de gaz) en fin d'exploitation.



- réservoirs connus de l'industrie pétrolière et gazière
- capacité à contenir des hydrocarbures démontrée
- infrastructures partiellement en place
- récupération assistée de pétrole (EOR)



- pas toujours situés à proximité des sources de CO₂
- volume global disponible insuffisant



EOR ou Enhanced Oil Recovery Une des techniques consiste à injecter du CO₂ pour améliorer la récupération des hydrocarbures. Le gaz injecté va d'abord être utilisé pour maintenir la pression du réservoir. Au-delà d'une certaine pression, CO₂ et huile ne forment plus qu'une phase, ce qui a pour effet de réduire la viscosité du pétrole, d'améliorer sa mobilité et donc d'augmenter son taux de récupération. Le CO₂ pouvant s'échapper avec les fluides de production est récupéré et renvoyé dans le réservoir.

Le stockage en veines de charbon

La veine de charbon n'est pas utilisée comme réservoir mais le stockage du CO₂ repose sur son **adsorption** par le charbon, ainsi que sur le **remplissage d'une porosité de fracture et des micropores** par le gaz.

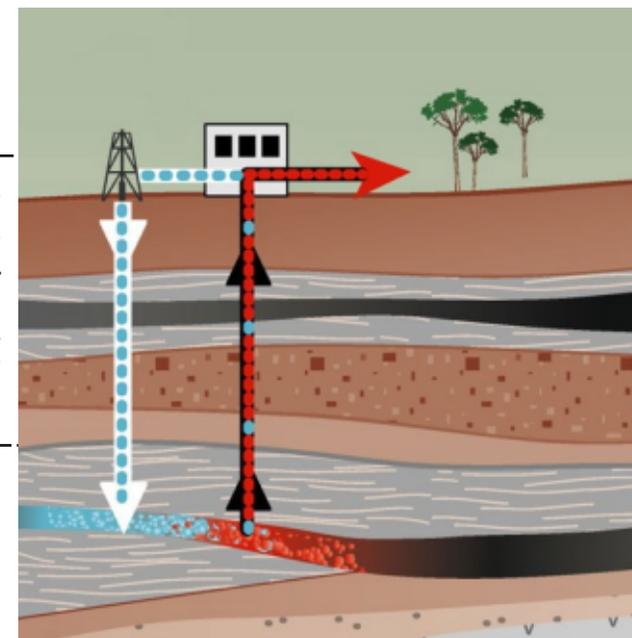


- intéressant localement (par exemple chez nous)
- récupération assistée de méthane (ECBMR)



- nécessité d'une couverture étanche
- procédé encore à l'étude (mais des pilotes existent : *ReCoPol, Alberta Research Council project in Canada, Allison Unit CO2-ECBM Pilot*)

ECBMR ou Enhanced Coal Bed Methane Recovery Ce type de piégeage provoque la libération du méthane naturellement contenu (adsorbé) dans le charbon, car celui-ci a la capacité d'adsorber préférentiellement le CO₂ au méthane initialement présent. Il peut ainsi être récupéré dans des puits producteurs.

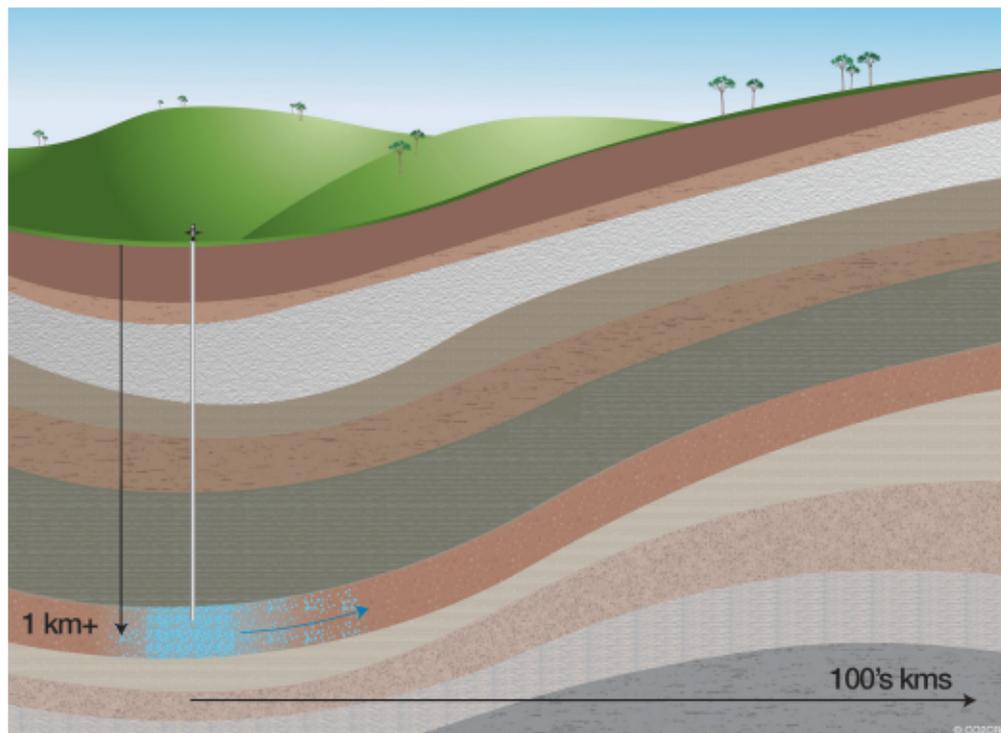


Le saviez-vous ?

On s'intéresse aux formations non exploitées car le houiller ayant subi l'extraction du charbon est truffé de galeries de mines, qui sont autant de chemins de migration rapides du CO₂ vers la surface.

Le stockage en aquifères salins

Par **dissolution du gaz dans l'eau** salée, celle-ci s'alourdit et entraîne le CO₂ vers le bas de l'aquifère. On parle de *piégeage physique hydrodynamique*, qui se traduit par une migration très lente des fluides sur de longues distances. Après plusieurs milliers d'années, un autre mécanisme de piégeage intervient : la *minéralisation du CO₂*, qui se précipite alors sous forme de carbonate.



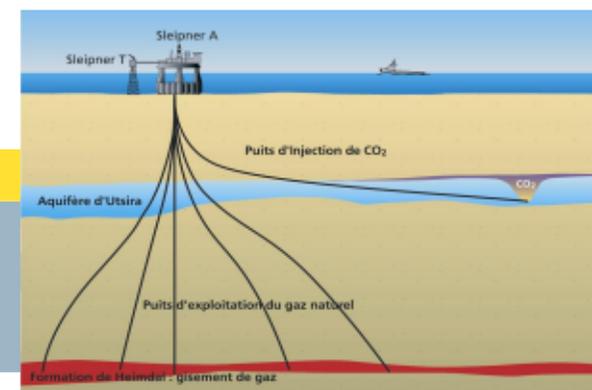
- nombreux sites et bonne distribution sur la planète
- superficie de plusieurs milliers de km²
- eau salée impropre à la consommation



- mal connus

L'exemple de Statoil

Depuis 1996, le groupe pétrogazier norvégien Statoil capte et renvoie dans le sous-sol marin le CO₂ produit par sa plate-forme gazière de Sleipner (8,5% du gaz naturel extrait), en Mer du Nord. Cela représente 1 millions de tonnes de CO₂ par an.



Le CO₂ en chiffres

125 ans

c'est la durée de vie du CO₂ dans l'atmosphère

0,001 %

c'est le taux de fuite moyen annuel du CO₂ stocké en profondeur, considéré comme sans danger

9 tonnes

ce sont les émissions annuelles de CO₂ par habitant pour l'Union Européenne

- 18 °C

c'est la température à la surface de notre planète s'il n'y avait pas d'effet de serre

2^e

gaz à effet de serre le plus important dans l'atmosphère, après la vapeur d'eau

90 %

du dioxyde de carbone émis provient de la combustion des énergies fossiles

1000 à 10000 milliard de tonnes

c'est la capacité estimée de stockage souterrain du CO₂

0,038 %

c'est la concentration (par unité de volume) en CO₂ de l'air que nous respirons

73 bars

c'est la pression à laquelle le CO₂ atteint l'état supercritique

Adsorption (à ne pas confondre avec absorption) Phénomène de surface par lequel des molécules de gaz ou de liquides se fixent sur les surfaces solides selon divers processus.

Air-gun (ou canon à air) Source sismique qui décharge brusquement dans l'eau de l'air comprimé à haute pression pour provoquer une onde sismique qui se propage jusque dans le sol.

Anaérobie Qui n'a pas besoin d'air ou d'oxygène pour fonctionner.

Anthropique Relatif à l'activité humaine. Qualifie tout élément provoqué directement ou indirectement par l'action de l'homme.

Aquifère salin Roche sédimentaire saturée d'eau salée, impropre à la consommation, de laquelle de l'eau peut être extraite et dans laquelle des fluides peuvent être injectés.

Dôme de sel (ou dôme salin) Structure naturelle, de taille kilométrique, formée par la remontée de sel, plus léger que les roches avoisinantes.

Faille Plan ou zone de rupture le long duquel deux blocs rocheux se déplacent l'un par rapport à l'autre.

Grand départ Technique de forage qui permet l'exploitation de plusieurs réservoirs à partir d'une même plate-forme offshore, ou d'exploiter un gisement marin à partir de la côte.

Hydrocarbures Composés organiques contenant exclusivement des atomes de carbone (C) et d'hydrogène (H). Ils possèdent en conséquence une formule brute de type : C_nH_m, où n et m sont deux entiers naturels.

Kérogène (à ne pas confondre avec le kérosène) Substance intermédiaire entre la matière organique et les combustibles fossiles.

Oléoduc Tube de transport de pétrole.

Pression de pore (ou pression interstitielle) Pression des fluides dans les pores d'un réservoir.

Roche-mère Roche où se forment les premières gouttelettes d'hydrocarbure, par la décomposition de la matière organique contenue dans des sédiments marins.

Solvant Liquide qui a la propriété de dissoudre et de diluer d'autres substances sans les modifier chimiquement et sans lui-même se modifier.

Supercritique On parle de fluide supercritique lorsqu'un fluide est chauffé au-delà de sa température critique et lorsqu'il est comprimé au-dessus de sa pression critique. Les propriétés physiques d'un fluide supercritique (densité, viscosité, diffusivité) sont intermédiaires entre celles des liquides et celles des gaz.

Biblio- et webographie

- BOY DE LA TOUR X., « Le pétrole, au-delà du mythe », IFP, éd. Technip, 2004
- LE THIEZ P. et ROJEY A., « Captage, transport et stockage géologique du CO₂ », IFP, 2007
- LEGAULT A., « Pétrole, gaz et les autres énergies - le petit traité », éd. Technip, 2007
- « Estimates of undiscovered oil and gas north of the arctic circle », USGS, juillet 2008
- « Le captage et le stockage géologique du CO₂ », Total, 2007
- « Les gisements très enfouis au-delà de 5000 mètres », conférence de presse, IFP, mai 2005
- « Les réserves en hydrocarbures de l'Arctique », IFP, octobre 2007
- « Piégeage et stockage du CO₂ », GreenFacts, 2007
- « Réservoirs très enfouis, de nouvelles conquêtes », coll. savoir-faire, Total, mars 2007

- <http://www.planete-energies.com>
- <http://www.wikipedia.org>

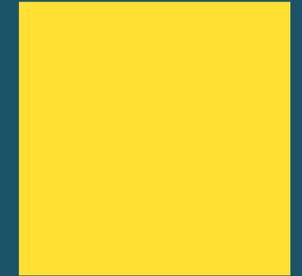
Crédit photos

Couverture : Total ; **p. 5 (hg)** : Total - **(bg)** : GIEC 2007 - **(bd)** : US DOE ; **p. 6** : Total - **(bg)** : ULg ; **p. 7 (bg et hd)** : Total ; **p. 8 (hg)** : David McNew/Getty - **(hd, bg et bd)** : Total - **(md)** : US Navy ; **p. 9 (md et bd)** : Total - **(hg)** : DEG Canada - **(hd)** : Ministère français / Economie Finances Industries - **(mg)** : Académie française - **(bg)** : ALVA ; **p. 10 (hd)** : Total - **(bd)** : Maywei Int. ; **p.11** : Shell ; **pp. 12, 13 et 14** : Total ; **p. 17 (bg)** : G. Mossop (RN Can) ; **p. 18 (hg et d)** : USGS - **(bg)** : IFP ; **p. 19 (hg et bd)** : Total ; **p. 23 (hg)** : conseil-et-formation.net - **(bg)** : GIEC ; **p. 24 (hd)** : NASA - **(bg)** : GIEC ; **p. 26** : Total et Cube Trois ; **p. 27 (bg et hd)** : CO2CRC ; **p. 28 (hd)** : BRGM & AIE ; **p.29** : adapté de US DOE ; **p. 30 (hd)** : CO2CRC ; **p.31 (hd)** : CO2CRC - **(bd)** : Statoil.

Les autres images sont soit sous licence GNU FDL, soit libres de droits.

Alors, prêts à relever ces défis ?

Dossier pédagogique réalisé en support à un exposé scientifique dans le secondaire que la Faculté Polytechnique de Mons propose dans le cadre de ses actions de promotion des Sciences & Techniques coordonnées par la cellule **ApplicaSciences*** – www.umons.ac.be/applicasciences



* ApplicaSciences bénéficie du soutien du Service Public de Wallonie (DGO6)

