

Les jeunes, la chimie et les sciences de la vie

L'industrie chimique et le pétrole

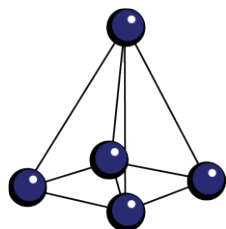


Dossier pédagogique réalisé dans le cadre du programme de conférences
« *Les jeunes, la chimie et les sciences de la vie* »
coordonné par la cellule
www.sciencesadventure.be

Ce dossier a bénéficié de la relecture avisée de **Jean-Noël Bertrand**,
conférencier senior responsable du thème.



CONSTRUIRE LE FUTUR DE LA CHIMIE ET DES SCIENCES DE LA VIE
CENTRE DE COMPETENCE



Fonds de Formation
Industrie chimique

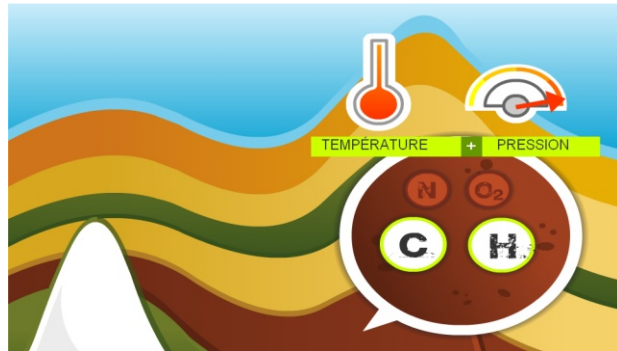


Table des matières

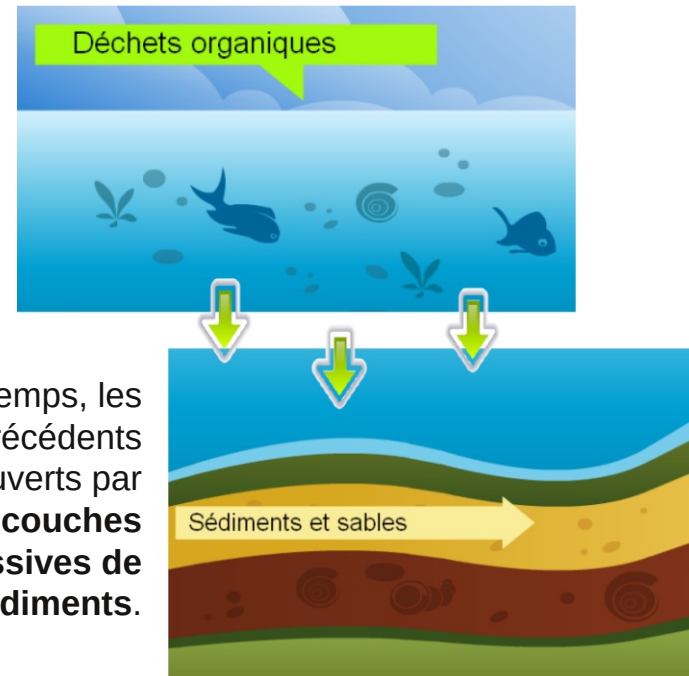
La formation du pétrole	4
La production du pétrole	5
Les réserves de pétrole	8
La demande en pétrole	9
La composition du pétrole brut	10
Le raffinage	11
Le moteur à combustion interne	18
L'indice d'octane	19
Références	21

La formation du pétrole

De la **matière organique** d'origine végétale ou animale, composée de **carbone**, d'**hydrogène**, d'**azote** et d'**oxygène**, se dépose au fond d'une zone d'eau profonde en même temps que du sable et de la vase.

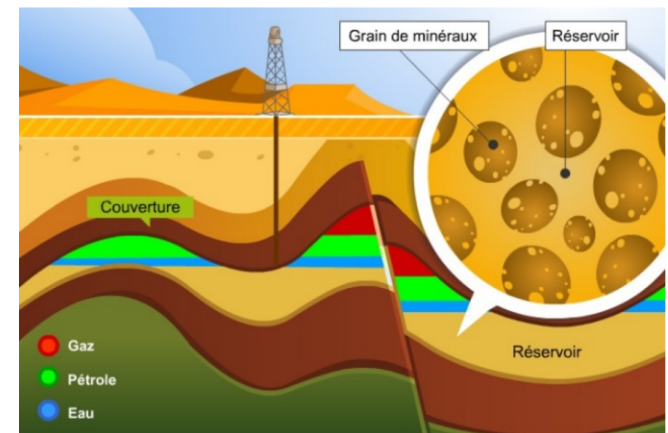


Au fil du temps, les dépôts précédents sont recouverts par des **couches successives de sédiments**.

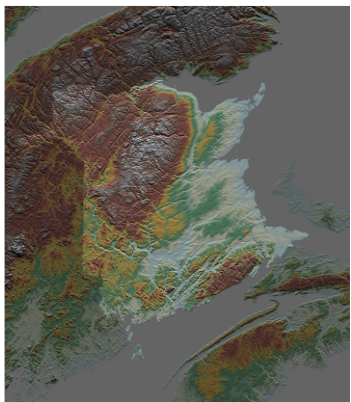


Au bout de **dizaines de millions d'années**, la transformation des matières organiques commence sous l'influence des **agents bactériens** et d'une **augmentation de la température et de la pression** (environ 3 °C et 25 bars tous les 100 m). L'azote et l'oxygène sont éliminés et des **hydrocarbures gazeux ou liquides se forment** : c'est le gaz naturel et le pétrole.

Moins denses que la roche qui les a vu naître, les hydrocarbures **migrent vers la surface** mais des **roches imperméables** entravent leur remontée. Ils vont alors être **piégés** dans une couche poreuse et former un **gisement**, qui ressemble à une gigantesque éponge imbibée de liquides et de gaz. Le gisement contient, de bas en eau, de l'**eau salée**, du **pétrole** et du **gaz**.

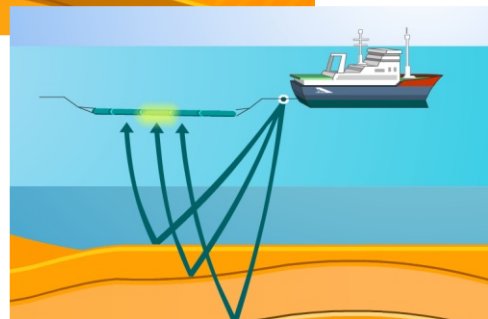
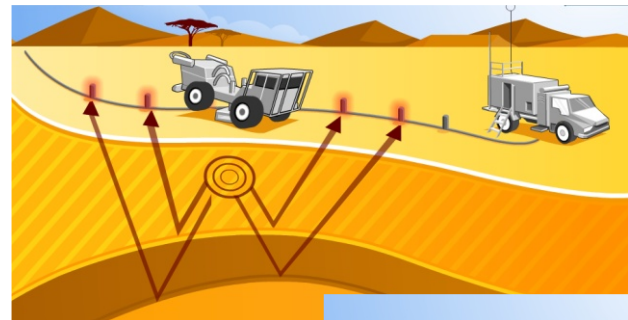


La production du pétrole (1)



Après avoir repéré (par photos aériennes ou images satellites) des structures (plissements, failles) qui pourraient se traduire par la **présence de pièges à pétrole** en profondeur, des géologues récoltent et analysent divers échantillons de roches pour les caractériser.

Pour conclure à la présence d'un gisement, il s'agit ensuite de mener une **campagne sismique** pour obtenir une représentation en 3D du sous-sol. Sur terre, des camions vibreurs frappent le sol pour générer des mini-tremblements. En étudiant ces ondes sismiques, ils peuvent **connaître les propriétés physiques des roches** traversées. En mer, ce sont des bateaux équipés d'un canon à air comprimé qui vont provoquer une onde sismique qui se propage jusque dans le sol. Un **forage exploratoire** est finalement réalisé pour **vérifier la présence d'un gisement** d'hydrocarbures exploitable.



On peut identifier des grandes provinces pétrolières et gazières à travers le monde. Ainsi, le **Moyen-Orient** détient **plus de 60% des réserves** de brut prouvées.



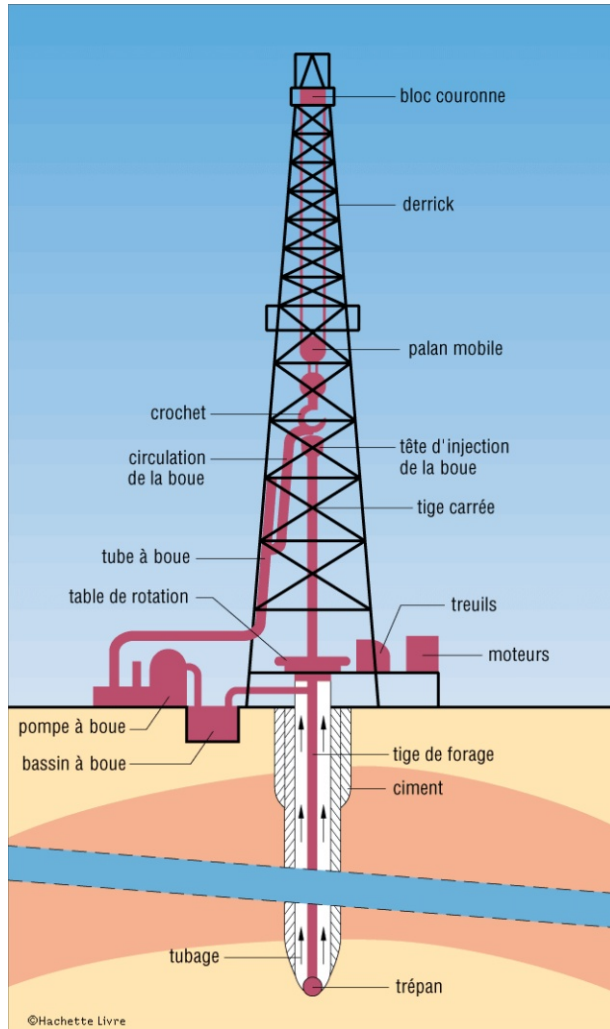
Du pétrole en Pennsylvanie !

Le 27 août 1859, du pétrole jaillit pour la première fois du sous-sol des États-Unis. Ayant creusé à 23 mètres de profondeur, le Colonel Drake trouve du pétrole, beaucoup de pétrole ! Une ère nouvelle s'ouvre pour l'humanité...

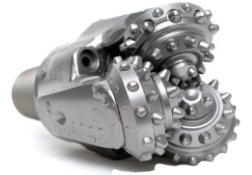


La production du pétrole (2)

La production consiste à **faire remonter vers la surface** les hydrocarbures emprisonnés dans le sous-sol. Comme les gisements sont très vastes (plusieurs kilomètres carrés), un certain nombre de forages sont nécessaires pour exploiter le réservoir.



Pour réaliser un forage, on installe tout d'abord une haute tour métallique, le derrick, qui sert de support à des **tiges de forage**. Au bout de la première tige, on fixe un outil de forage en trois parties, nommé **trépan**, muni de dents ou de pastilles en acier très dur. Il joue le rôle d'une énorme perceuse qui, grâce à un mouvement rotatif, broie la roche en petits morceaux.



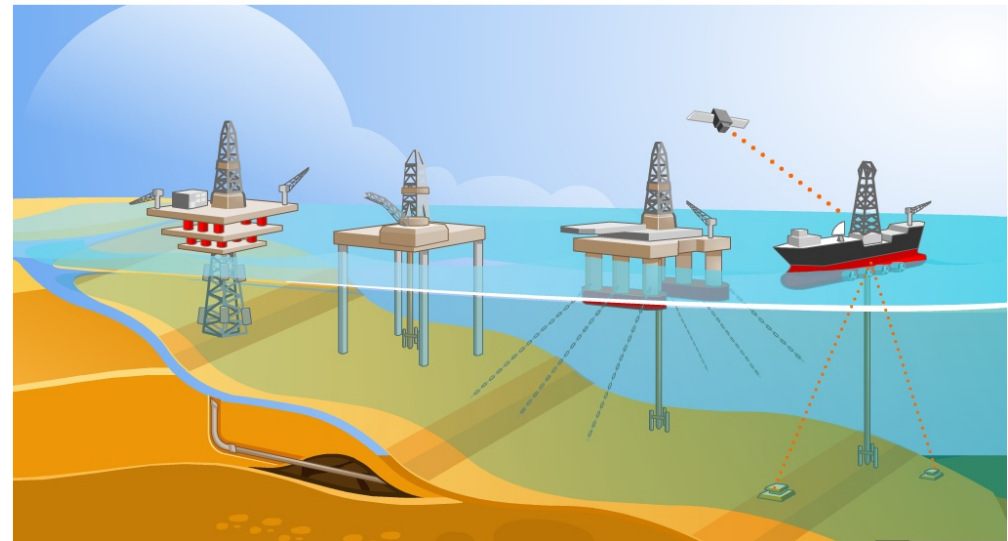
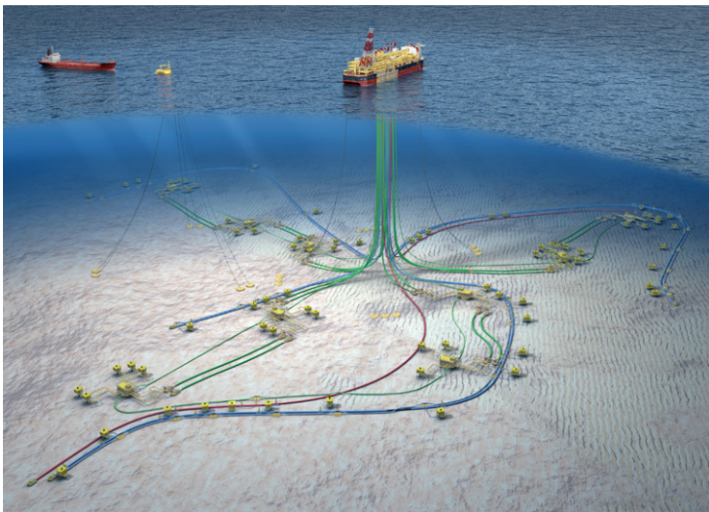
A mesure que l'on s'enfonce dans le sous-sol, on ajoute une nouvelle tige de forage en la vissant à la précédente pour obtenir la longueur souhaitée : on obtient un **train de tiges**. Pour éviter l'effondrement du trou, on pose progressivement sur toute sa longueur de gros cylindres creux pour réaliser un **tubage**.



Pendant que l'on creuse le trou, on y injecte en permanence de la **boue de forage**. Son rôle est multiple : **refroidir** l'outil de forage, faciliter l'attaque de la roche, **ramener les déblais** à la surface et **consolider les parois** du puits. Elle sert également à équilibrer la pression à l'intérieur du tubage pour éviter un jaillissement brutal de pétrole, d'eau ou de gaz.

La production du pétrole (3)

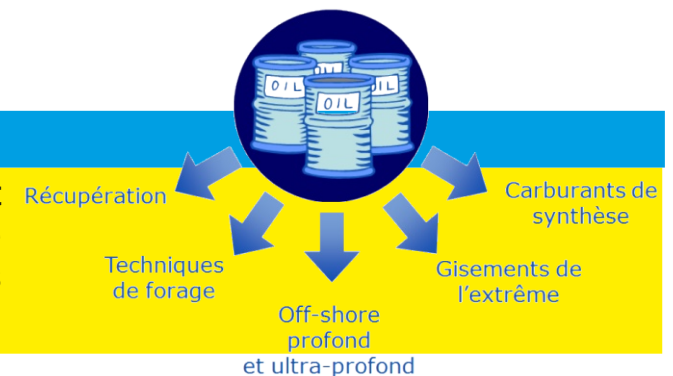
Outre son **exploitation sur terre** (*on-shore*), un gisement d'hydrocarbures peut être exploité **en pleine mer** (*off-shore*). Il existe différents types d'appareils de forage, adapté chacun à une profondeur d'eau. Lors de la production sur plateformes fixes et semi-submersibles, gaz et pétrole sont acheminés par pipeline vers un terminal terrestre.



Pour des zones où déployer un pipeline est impossible voire trop coûteux, on utilise une **unité flottante de production, de stockage et de déchargement** (FPSO), un navire à positionnement dynamique qui stocke le pétrole avant qu'il soit récupéré par des pétroliers. Un FPSO recueille quotidiennement 240 000 barils et a une capacité de stockage de 2 millions de barils.

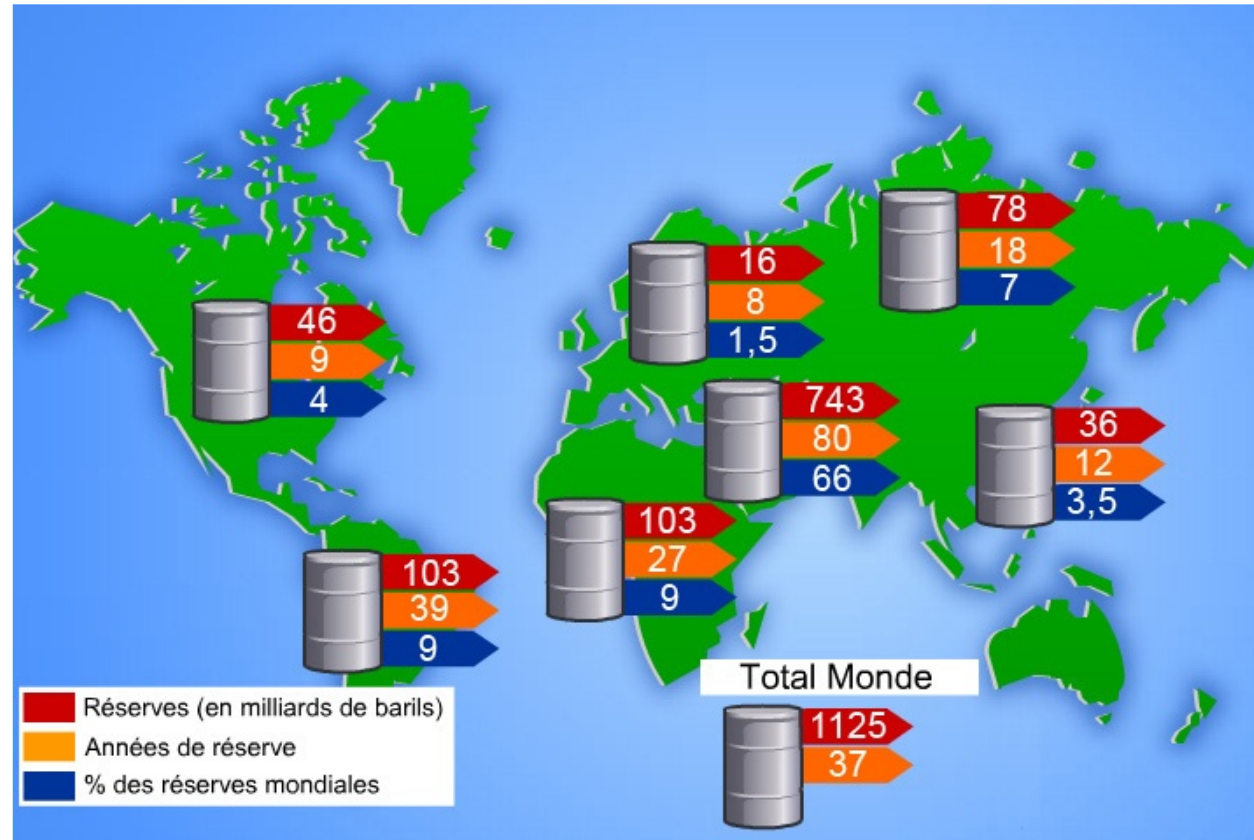
Des défis technologiques !

Avec les techniques classiques, pas moins des **deux tiers du pétrole découvert restent encore piégés** sous terre. Meilleurs forages, nouveaux dispositifs de pompage, gisements difficile d'accès... de nombreux défis technologiques que les pétroliers cherchent à relever !



Les réserves de pétrole

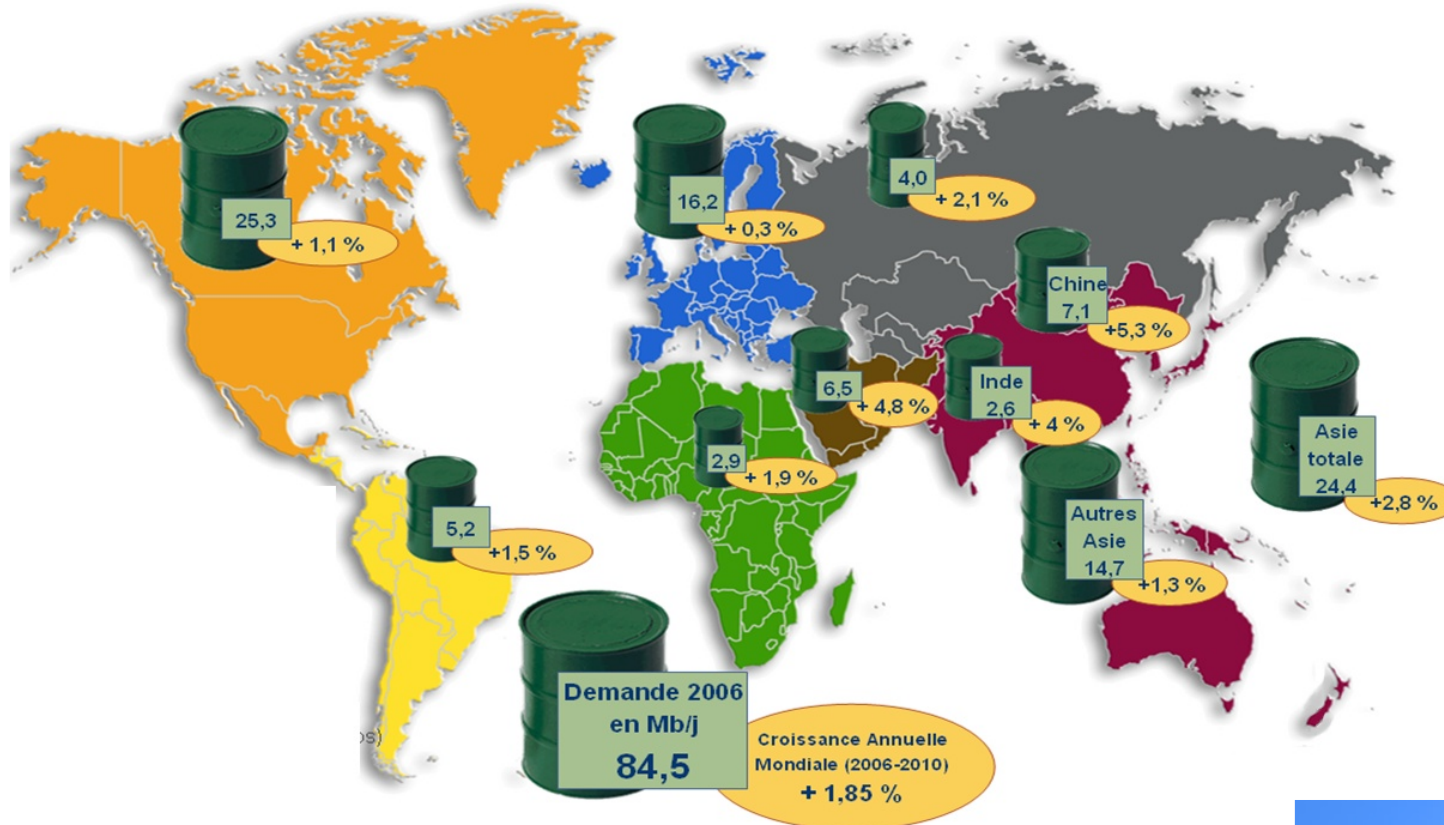
Les réserves pétrolières désignent, à partir de champs de pétrole découverts, la **part qu'il est possible d'exploiter** en tenant compte des contraintes économique et technologiques. Au niveau mondial, les pays appartenant à l'**OPEP** (organisation des pays exportateurs de pétrole) détiennent près de 75 % des réserves.



Estimer la **durée de vie des réserves** de pétrole brut est difficile car plusieurs facteurs interviennent :

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

La demande en pétrole



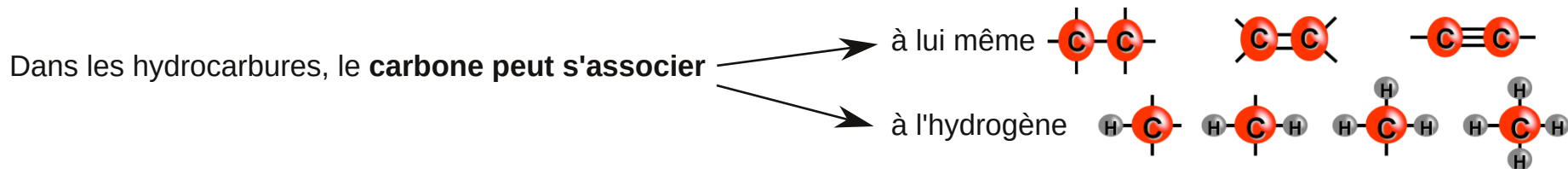
La consommation mondiale de pétrole représente **plus de 30 milliards de barils par an** (c'est-à-dire 13 milliards de litres par jour). Cette demande est en forte croissance : elle a augmenté de 11 % entre 1970 et 2000, on estime qu'elle va encore **augmenter de 30 à 40 % d'ici 2030**. C'est le résultat de la combinaison de plusieurs facteurs, tels que la croissance démographique, l'expansion du secteur des transports et l'émergence de nouveaux pays industrialisés.

Selon le lieu de production, le pétrole est **acheminé vers les raffineries par voie maritime (bateaux) ou terrestre (oléoducs)**. Globalement, la **moitié du pétrole part du Moyen-Orient** vers le Japon, les Etats-Unis ou l'Europe. Le coût du transport représente 5 à 10 % de la valeur ajoutée.

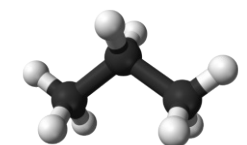
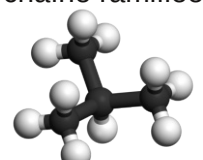
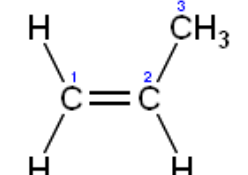
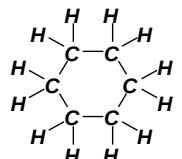
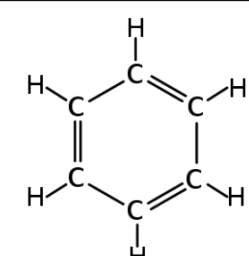
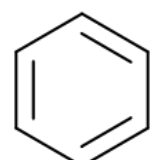
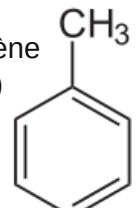


La composition du pétrole brut

Le pétrole est composé de molécules exclusivement constituées d'atomes de carbone (C) et d'hydrogène (H) : les **hydrocarbures**.

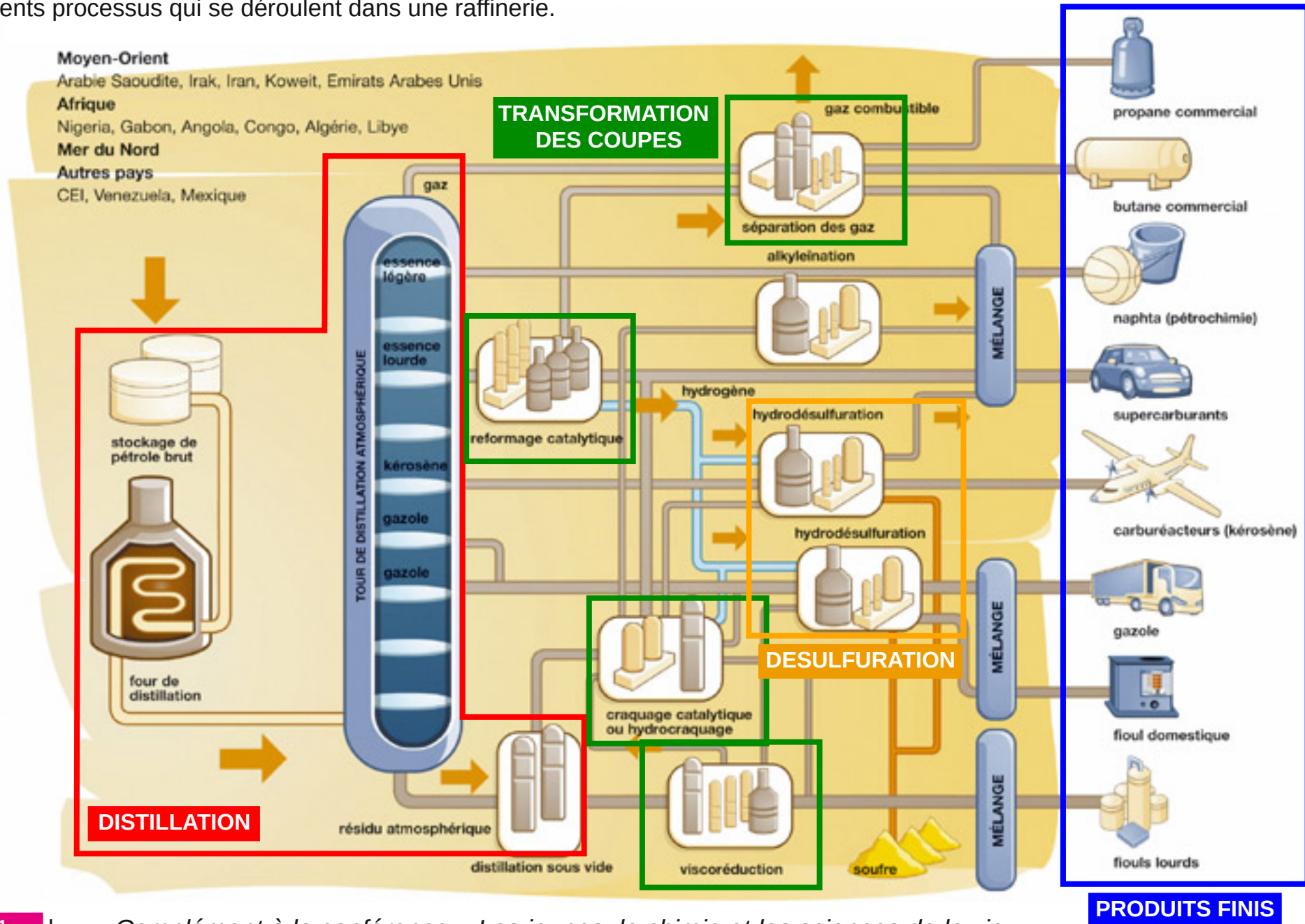


On les classe selon la **façon dont sont reliés les atomes de carbone et d'hydrogène** :

► les alcane s (ou paraffines)	quasi-totalité des gaz naturels et essentiel des pétroles usuels	liaisons simples C – C	$C_n H_{2n+2}$	 ex. : Propane (C ₃ H ₈) chaîne linéaire	 ex.: Isobutane (C ₄ H ₁₀) chaîne ramifiée
► les alcène s (ou oléfines)	principales matières de base des plastiques, solvants, cosmétiques...	au moins une liaison double C = C	$C_n H_{2n}$	ex.: Propylène (C ₃ H ₆) => polypropylène	
► les alcynes	agents de synthèse en laboratoire	au moins une liaison triple C ≡ C	$C_n H_{2n-2}$	ex.: Acétylène (C ₂ H ₂) => flammes haute T° (sidérurgie)	$H-C \equiv C-H$
► les naph tènes (ou cycloalcane)s	solvants et intermédiaires de la pétrochimie	base = cycle à 5 ou 6 atomes de carbone avec liaisons simples	$C_n H_{2n}$	ex.: Cyclohexane (C ₆ H ₁₂)	
► les aromatiques	solvants et produits de départ pour divers procédés industriels	base = cycle(s) avec alternance de liaisons simples et doubles (benzène)		 ou  benzène (C ₆ H ₆)	ex.: Toluène (C ₇ H ₈) 

Le raffinage (1)

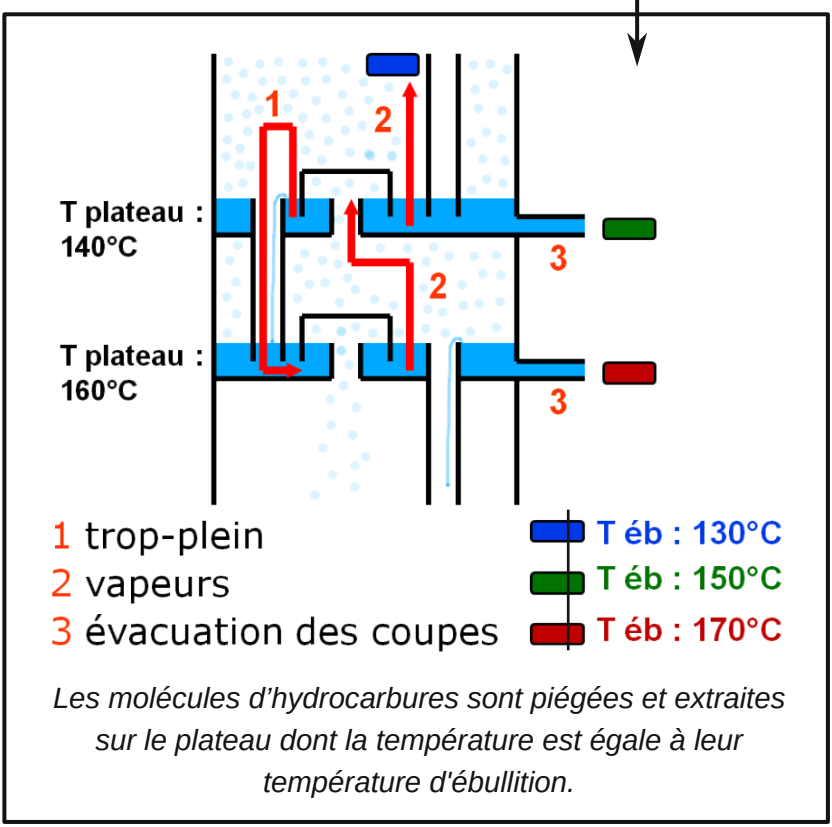
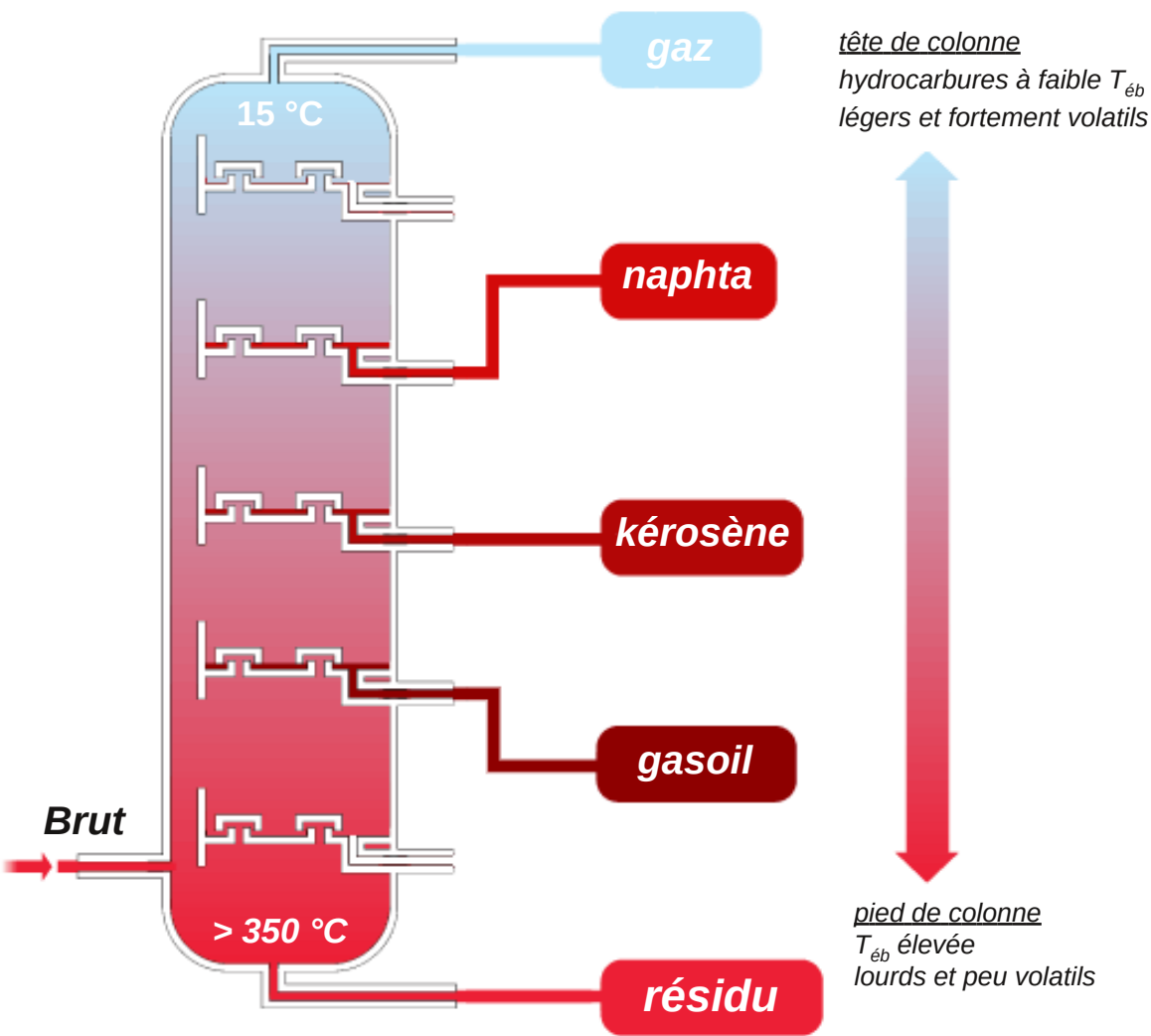
Le raffinage consiste à **obtenir des produits vendables à partir du pétrole brut**. Le schéma suivant permet d'identifier les différents processus qui se déroulent dans une raffinerie.



Le raffinage (2)

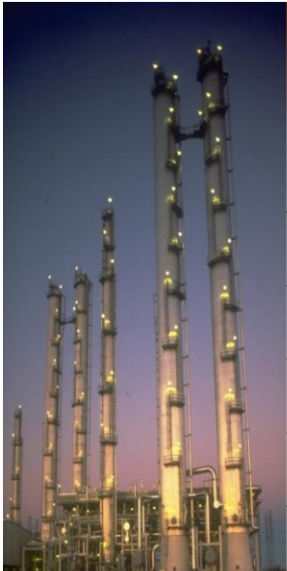
Première étape du raffinage, la **distillation** permet de **séparer les différentes fractions d'hydrocarbures** contenues dans le pétrole brut. On ne cherche pas à obtenir des produits purs, mais plutôt des "**coupes**", c'est-à-dire des mélanges plus simples réunissant des hydrocarbures dont le nombre d'atomes de carbone est proche. Cette distillation se fait en deux étapes.

Le pétrole est d'abord chauffé dans la colonne de **distillation atmosphérique**, une colonne fermée munie d'un certain nombre de plateaux (30 à 50) perforés et munis de clapets. Grâce à la **différence de température d'ébullition** des composants, la vaporisation des fractions plus ou moins légères conduit à une **distillation fractionnée**.



Le raffinage (3)

En laboratoire, une telle colonne de distillation ne mesure généralement que quelques mètres. Mais la distillation industrielle est à une toute autre échelle : le procédé se déroule au sein de tours pouvant facilement atteindre **60 mètres de hauteur** !



NOM	Point d'ébullition	Nombre de Carbones	Applications
LPG	< 15°C	C₂ - C₄	LPG Gaz de combustion
NAPHTA	15 - 180°C	C₅ - C₉	Essence moteur Pétrochimie
KEROSENE	180 - 250°C	C₁₀ - C₁₄	Jet fuel
GASOIL	250 - 350°C	C₁₅ - C₂₅	Mazout routier Mazout chauffage
WAX	350 - 550°C	C₂₅ - C₆₀	Lubrifiants
RESIDU	> 500°C	> C₆₀	Fuel lourd Bitumes

Sur toute la hauteur de la tour, on recueille à différents niveaux une dizaine de produits plus ou moins lourds, depuis les bitumes (mélanges d'hydrocarbures très visqueux) jusqu'aux gaz. Ces **fractions de produits légers, intermédiaires, moyens et lourds** sont nommées **coupes pétrolières**.

Après cette première distillation, la **partie résiduelle** est envoyée dans une autre colonne, moins haute et avec moins de plateaux, pour subir la **distillation sous vide**. On y fait la séparation **sous un vide relatif** (c'est-à-dire à très basse pression), ce qui permet d'abaisser la température d'ébullition plutôt que de chauffer à plus haute température.



Comme de l'eau qui bout ?

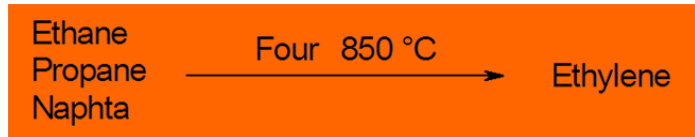
On peut comparer la distillation du pétrole à ce qui se passe en chauffant de l'eau : avant que l'eau n'atteigne 100 °C, on observe de petites bulles de gaz dissous qui s'échappent peu à peu. À plus de 100 °C, l'eau bout et se transforme en vapeur. Au fond de la casserole, on trouve alors des résidus de sels (que l'on pourrait vaporiser en les chauffant à très haute température).



Le raffinage (4)

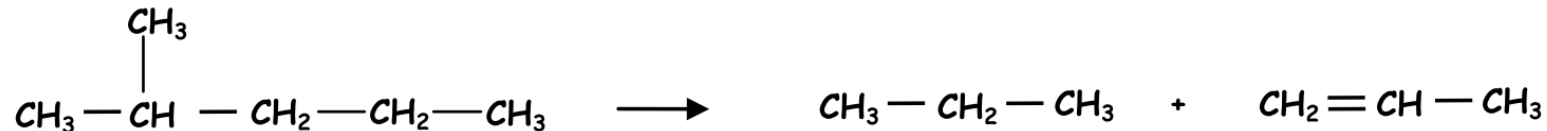
L'étape suivante dans le raffinage des hydrocarbures est la **transformation des coupes**. Il s'agit d'une série d'opérations visant à améliorer ou fabriquer des produits finis par apport de chaleur, modification de pression et utilisation de catalyseurs. Principalement, on peut citer :

► le **craquage à la vapeur** (ou *vapocraquage*)



On introduit des coupes pétrolières telles que le **naphta** (ou des alcanes légers) dans le vapocraqueur qui possède une série de fours. À l'intérieur, grâce à une **température très élevée** et la présence de **vapeur d'eau**, les **molécules d'hydrocarbures à longue chaîne** sont **brisées** pour donner naissance à des **alcènes** (éthylène, propylène) mieux valorisés.

Exemple :

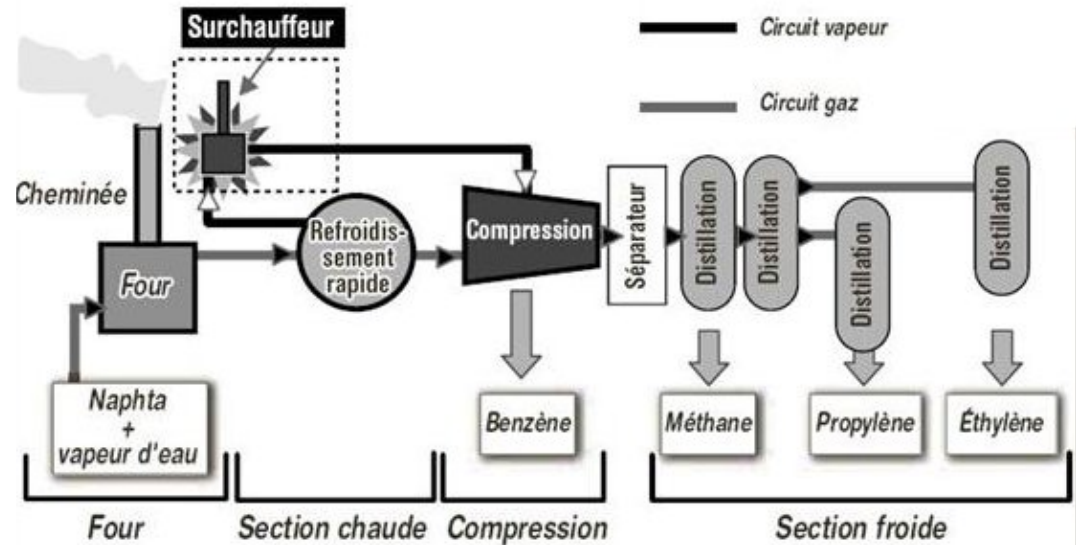


Ces **bases pétrochimiques** sont principalement utilisées par l'industrie des matières plastiques (polyéthylène, polypropylène, etc.) mais servent également dans les domaines de la cosmétique, la pharmacie, la construction, l'industrie électrique, électronique, le textile, l'aéronautique, etc.



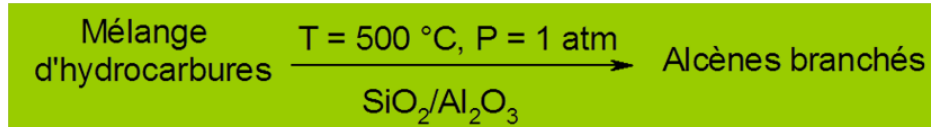
La longueur d'une chaîne définit son état physique

C1 – C4 → gazeux (gaz naturel) | **C5 – C20** → liquide (essence) | **C21 – C1000-2000** → solide (paraffine)



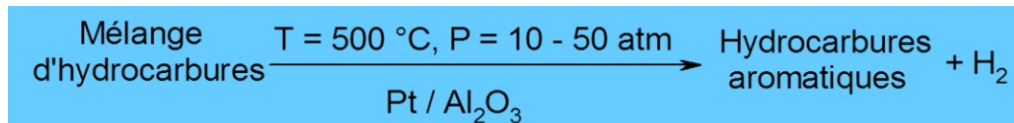
Le raffinage (5)

► le *craquage catalytique*

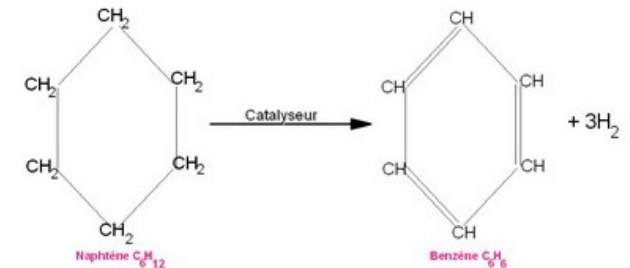
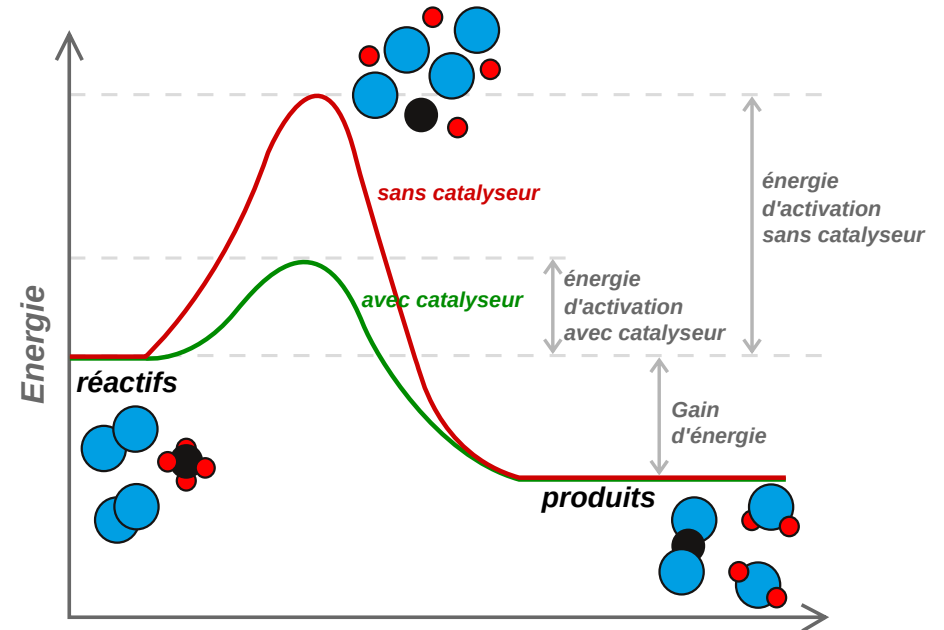


Dans ce cas, des **catalyseurs** sont utilisés pour favoriser et accélérer cette réaction de craquage. Cela permet de la réaliser à **plus basses température et pression**, ce qui entraîne un gain d'énergie et rend le procédé meilleur marché.

► le *reformage catalytique*



Il permet d'obtenir, à partir des essences lourdes et sous l'action de la chaleur, de la pression et d'un catalyseur, des **essences à haut indice d'octane** qui entrent dans la composition des carburants automobiles. À partir d'un naphta lourd débarrassé de soufre, le produit passe à travers une série de 3 réacteurs qui transforment les **produits naphténiques en produits aromatiques** en les débarrassant partiellement de l'hydrogène.



Le saviez-vous ?

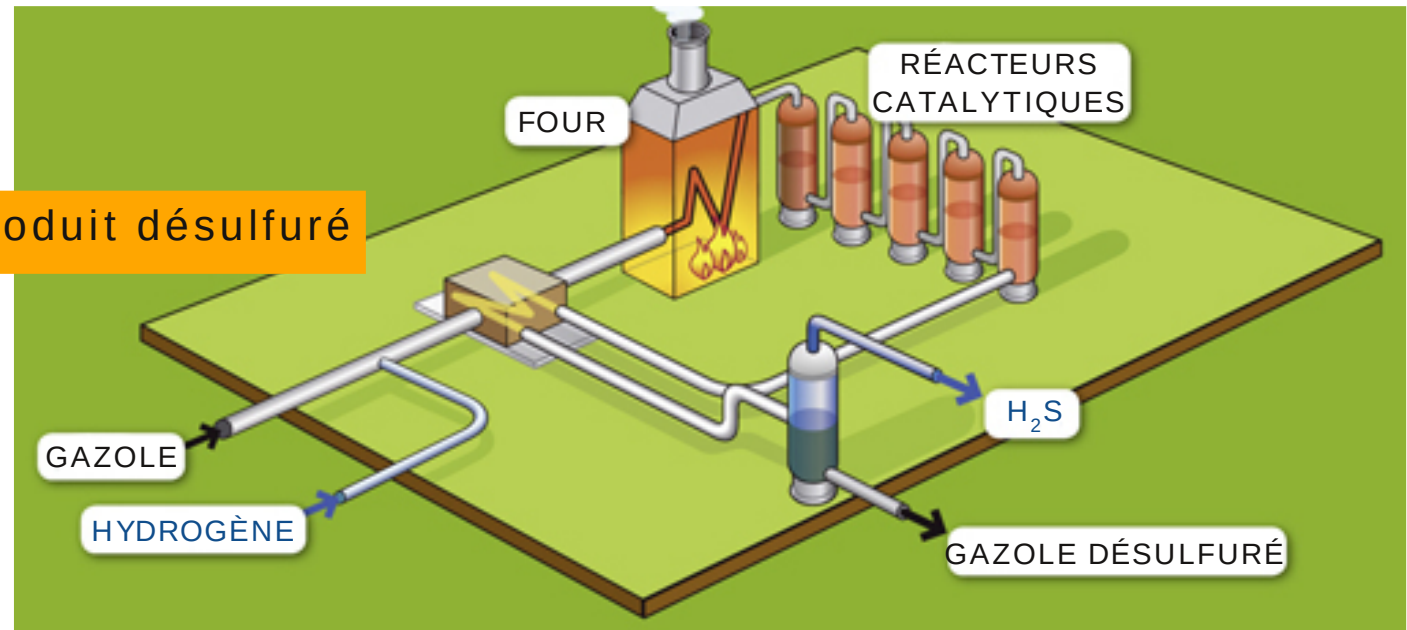
Le rôle principal des **catalyseurs** est de **réduire l'énergie qu'il faut donner aux molécules pour qu'elles réagissent entre elles**. Cela permet d'accélérer les réactions chimiques de manière considérable tout en réduisant les coûts de fonctionnement. Dans les organismes vivant, ce sont les enzymes qui jouent ce rôle précieux : sans eux, les réactions nécessiteraient des températures détruisant une grande partie de la matière organique. Dans le cas du raffinage, les catalyseurs sont habituellement déposés sur des supports poreux et agissent sur les réactifs qui sont en phase liquide ou gazeuse. Les catalyseurs sont de la plus grande **importance dans le monde industriel**.

Le raffinage (6)

Une étape importante du raffinage est l'**épuration du soufre (ou désulfuration)**. Elle a pour but d'éliminer, en présence d'hydrogène, le soufre contenu dans les coupes gazoles et le fioul domestique. Cette opération permet d'épurer les carburants mais aussi d'**extraire le soufre** destiné à l'industrie chimique.



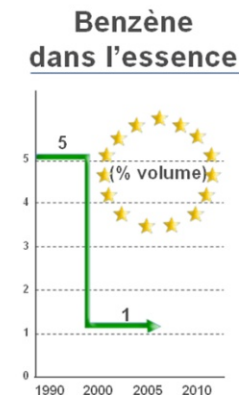
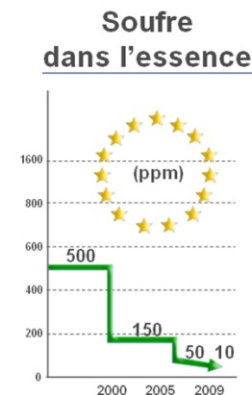
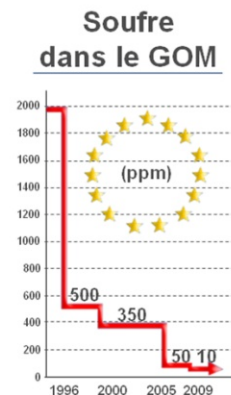
Au contact d'un catalyseur, l'hydrogène se combine d'abord au soufre pour donner de l'hydrogène sulfuré H_2S .



L'hydrogène sulfuré est alors transformé en soufre suivant un procédé d'**oxydation à haute température** faisant également intervenir un catalyseur :



Que ça soit pour le gazole moteur (GOM) ou l'essence, l'épuration a connu des progrès considérables au cours des deux dernières décennies.



Le raffinage (7)

Après ce parcours au sein de la raffinerie, on obtient enfin les **produits finis** :

► le **GPL** (ou LPG pour *Liquefied Petroleum Gas*), qui se compose des fractions les plus légères du pétrole et sert principalement au **chauffage**, pour les **cuisinières à gaz** et comme **matière première** pour la pétrochimie. Il joue aussi un rôle de plus en plus important en tant que **carburant** automobile.



► les **carburants** tels que l'**essence** pour les automobiles (qui se compose des fractions légères), le **kérosène** pour les avions (plus lourd que l'essence) et le **diesel** (ou gazole) principalement pour les poids lourds, les autobus, les bateaux, les machines agricoles et de chantiers et aussi les automobiles.

► les **huiles** telles que le **mazout** (huile de chauffage extra-légère) et le **fioul lourd** (huile de chauffage lourde) pour le chauffage domestique et industriel, ainsi que les huiles de base des **lubrifiants** destinés à réduire les frottements des pièces mobiles des moteurs et des machines.



► le **bitume**, fabriqué à partir d'un résidu très visqueux, qui est utilisé pour les **revêtements routiers** mais sert aussi à la fabrication de **produits d'étanchéité ou d'isolation** et d'**emballages** résistant à l'humidité.

► les **matières de base pour l'industrie chimique et pharmaceutique**, dont sont issus une multitude de **produits d'usage quotidien**.

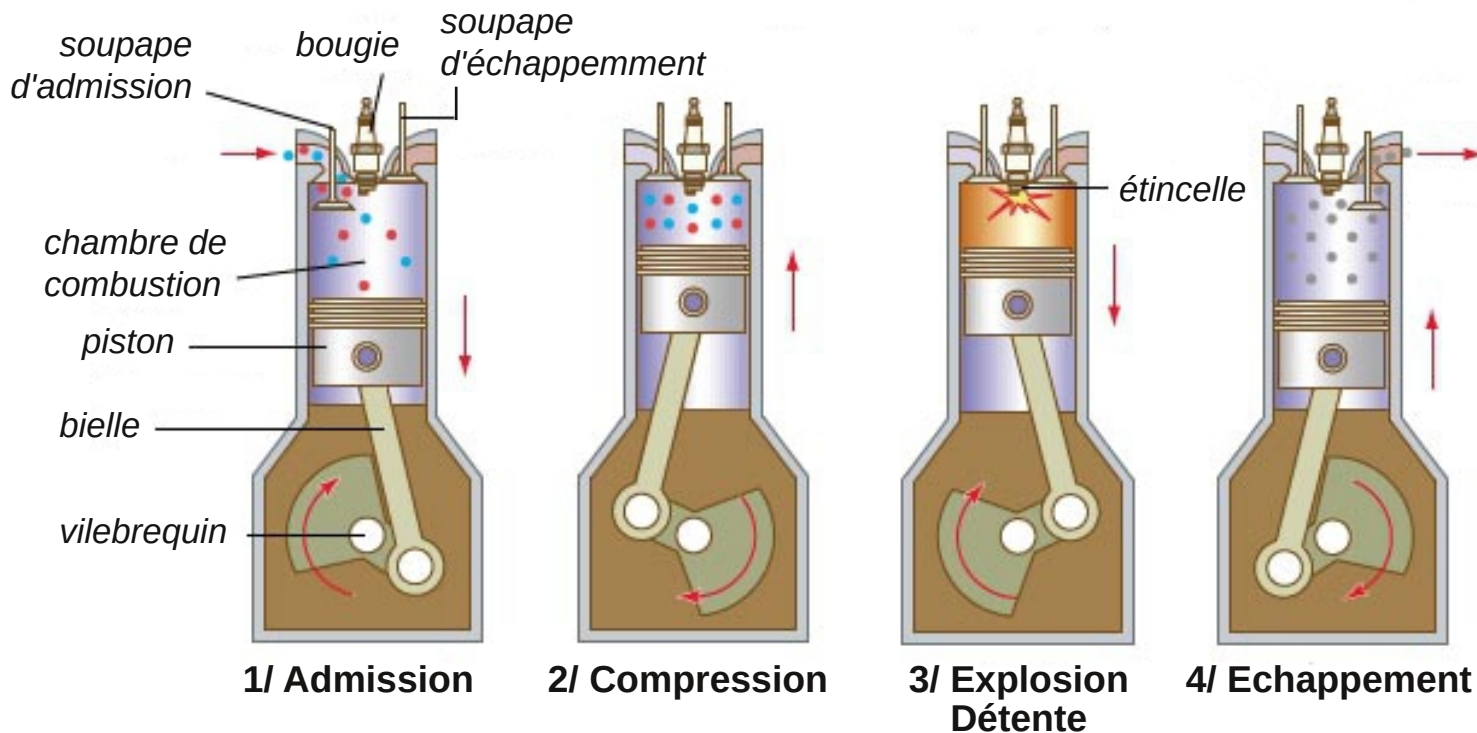


Les produits du raffinage, matières premières pour la pétrochimie

Les **paraffines** et les **cires** servent à la fabrication de **bougies**, à l'imprégnation de **surfaces** et sont utilisées dans l'**industrie chimique et pharmaceutique**. Les **huiles blanches**, d'un degré de pureté remarquable, servent de substances de base à l'**industrie pharmaceutique**. A partir des alcènes, on produit des **fibres synthétiques** et des **matières plastiques**, alors que les **aromatiques** sont utilisés dans l'industrie chimique comme **solvants** et pour de nombreux procédés de fabrication. Même le **soufre**, récupéré lors de la désulfuration, trouve des débouchés dans l'industrie chimique.

Le moteur à combustion interne

Le cycle de fonctionnement d'un moteur à combustion interne se décompose en quatre temps :



1) ouverture de la soupape d'**admission** et descente du piston, ce dernier aspire ainsi le mélange d'air et de carburant vaporisé dans le cylindre;
2) fermeture de la soupape d'admission et **compression** du mélange dans la chambre de combustion par la remontée du piston;
3) quand le piston atteint son point culminant et que la compression est au maximum, la bougie d'allumage produit une **étincelle** qui déclenche une **combustion** rapide (le temps moteur) et les gaz chauds repoussent le piston, initiant le mouvement;
4) ouverture de la soupape d'**échappement** et remontée du piston qui chasse les gaz brûlés détendus.

La **réaction de combustion** s'appelle « explosion ». L'explosion n'est pas la même quand on allume son briquet (**déflagration**) ou quand on fait sauter une bombe (**détonation**). Ce sont des réactions très rapides, mais la détonation va 10 000 fois plus vite que la déflagration et est toujours **accompagnée d'une onde de choc avec effet destructeur**.

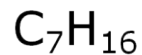
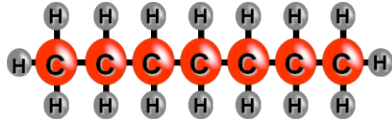


Dans un moteur à essence, **au cours du deuxième temps**, on comprime à grande vitesse un mélange d'air et d'essence dont la température va atteindre 450 °C quand le piston sera en haut. Pendant cette montée du piston, des **réactions d'oxydation** se produisent à partir de 300 °C et provoquent la **formation de produits peroxydés instables**. Ceux-ci vont se décomposer brutalement en produisant une **détonation avec onde de choc** qui se traduit par un phénomène de *cliquetis* (chapelet de petits bruits métalliques au moment des accélérations).

L'indice d'octane

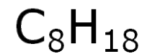
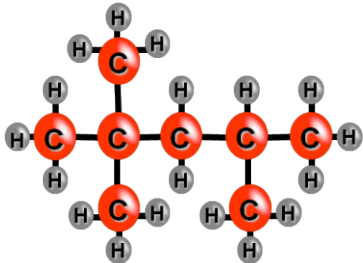
Pour mesurer la qualité d'une essence, on mesure les détonations sur un moteur de laboratoire (moteur CFR), qui est équipé d'un *quartz piézoélectrique* dans la culasse chargé de transformer les ondes de choc en courant électrique. Deux hydrocarbures sont utilisés comme référence : **le normal heptane C_7H_{16}** et **l'iso-octane C_8H_{18}** . Le premier provoque un cliquetis catastrophique, on lui a donc attribué un **indice 0**; au contraire, le second se comporte bien dans le moteur, on lui a donc donné un **indice 100**.

n-Heptane



RON = 0

Iso-octane = 2,2,4-triméthylpentane



RON = 100

↑

- 120 = benzène
- 100 = iso-octane
- 98 = Super 98
- 95 = Super 95
- 90 = n-butane
- 60 = n-pentane
- 30 = n-hexane
- 0 = n-heptane
- 20 = n-octane

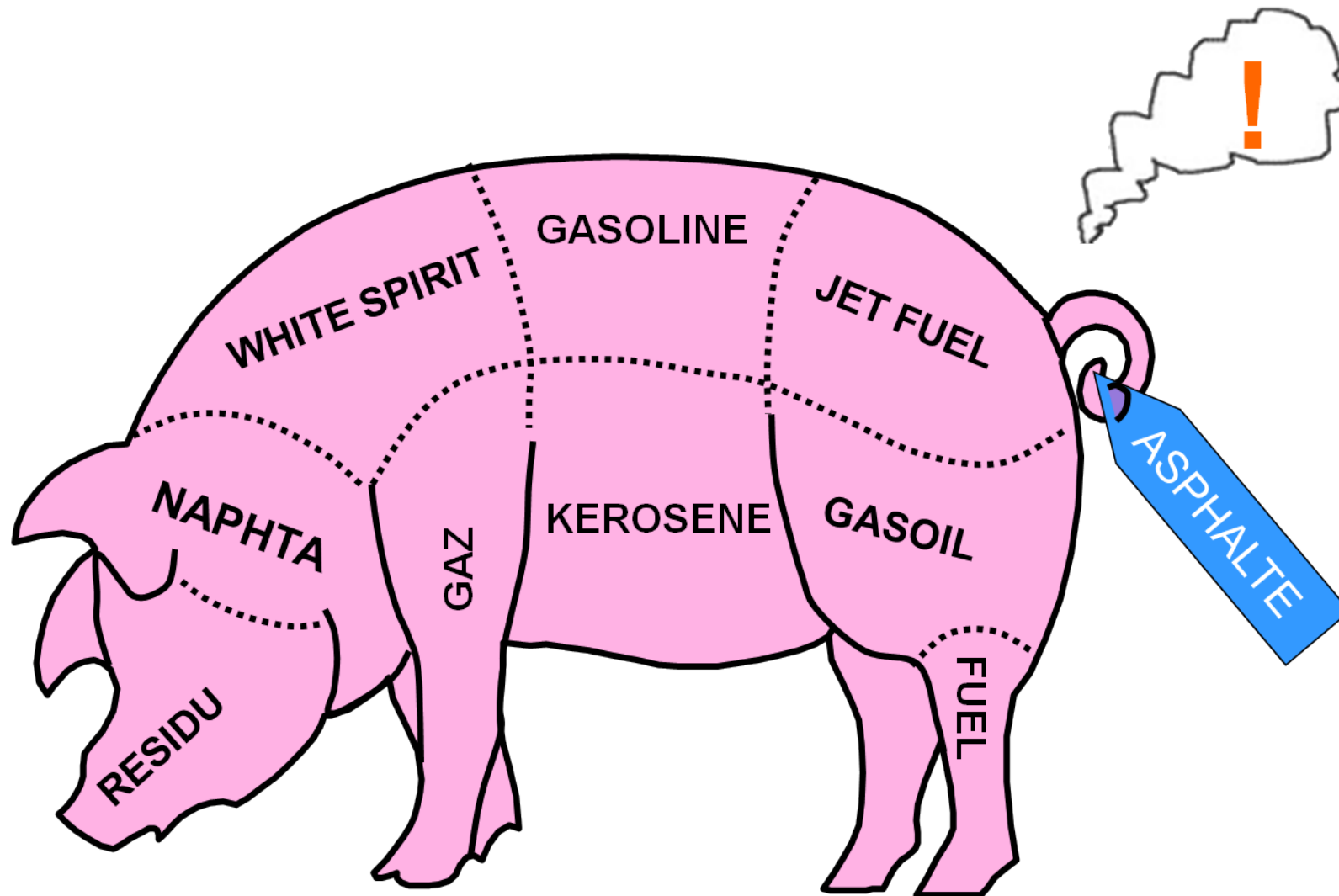
Avant de pouvoir proposer les essences ou les supers à la pompe, il faut donc **ajuster leur indice d'octane** (à 95 ou 98) pour éviter des dégâts au moteur et une perte de rendement. Cela peut se faire par des procédés de raffinage tels le reformage catalytique (où on utilise du platine comme catalyseur) et aussi par adjonction de substances à haut indice d'octane. On dit qu'un carburant a un **indice d'octane de 95** par exemple, lorsque celui-ci se comporte **comme un mélange de 95% d'iso-octane et de 5% de n-heptane**.



Le saviez-vous ?

L'**indice d'octane « recherche »** (ou **RON**, pour *Research Octane Number*) est celui qui vous est le plus familier puisque c'est à lui qu'on fait référence lorsqu'on parle de « super 95 » ou « super 98 ». Cet indice caractérise le comportement d'un carburant **à bas régime ou lors des accélérations**.

Dans le pétrole, tout est bon !



A consommer avec modération...

Références

Biblio- et webographie

- BERTRAND J.-N., « L'industrie chimique et le pétrole », conférence JCSV, Sciences adventure, 2012
- BOY DE LA TOUR X., « Le pétrole, au-delà du mythe », IFP, éd. Technip, 2004
- LEGAULT A., « Pétrole, gaz et les autres énergies - le petit traité », éd. Technip, 2007
- <http://www.planete-energies.com>
- <http://www.wikipedia.org>

Crédit photos

Couverture : Total ; **p. 4** : Total ; **p. 5 (hg)** : DEG Canada - **(bg et hd)** : Total ; **p. 6 (hd)** : Straightline HDD ; **(bd)** : ODP ; **p. 7** : Total ; **p. 8** : US DOE ; **p. 9** : Total ; **p. 11** : adapté de Total ; **p. 12** : adapté de BBC ; **p. 13 (d)** : INSA Rouen ; **p. 16 (h)** : adapté de IFP Energies nouvelles ; **p. 17 (md)** : Le Soir ; **p. 18 (h)** : adapté de Encyclopædia Britannica Inc.

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

« *Les jeunes, la chimie et les sciences de la vie* » est une action de sensibilisation des jeunes aux sciences par le biais de conférences spécialement conçues pour les élèves des trois dernières années du secondaire.

Ces conférences sont présentées en binôme formé d'un conférencier « junior » — jeune diplômé qui témoigne de son expérience de chercheur ou d'enseignant, de sa passion et de ses études — et d'un conférencier « senior » — cadre actif ou (pré)retraité qui témoigne de son métier, de son expérience en industrie et de sa carrière professionnelle.

