

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE HOUARI BOUMEDIENE  
FACULTE DE GENIE MECANIQUE ET DE GENIE DES PROCEDÉS



Deuxième Année Licence  
Spécialité : Génie des Procédés

## MODULE

### Introduction au Raffinage et à la Pétrochimie



Polycopié de cours

Rédigé par :

**Dr. Leila HASSAINI**

Année universitaire 2024/2025

## **AVANT-PROPOS**

Ce polycopié est un recueil de notes, de documents et de principes pris dans la littérature pour enrichir et constituer un support au cours intitulé : « Introduction au Raffinage et à la Pétrochimie », destiné aux étudiants de la deuxième année Licence en Génie des Procédés.

Ce polycopié constitue une initiation aux fondamentaux du domaine pétrolier et gazier, offrant ainsi aux étudiants les bases nécessaires sur l'origine du pétrole et son extraction ainsi que sur l'ensemble des processus impliqués dans l'industrie de raffinage et de pétrochimie.



**Semestre : 4****UE : UED 2.2**

Répartition du volume horaire de l'UE et de ses matières	Cours : 22h30 TD : 00h00 TP : 00h00
Crédits et coefficients affectés à l'UE et à ses matières	UED 2.2 crédits : 2 Matière 1 : Introduction au raffinage et à la pétrochimie Crédits : 1 Coefficient : 1
Mode d'évaluation (continu ou examen)	Examen : 100%
Description de la matière	Introduction au raffinage et à la pétrochimie <ul style="list-style-type: none"><li>- Expliquer la genèse des énergies fossiles.</li><li>- Maîtriser la nomenclature et les spécifications des produits pétroliers.</li><li>- Connaître les principaux procédés de raffinage et de pétrochimie et leurs produits.</li></ul>

## Sommaire

Introduction générale.....	1
<b>CHAPITRE I. Formation et Exploitation du Pétrole et du Gaz naturel</b> .....	2
I. Statistiques sur les réserves et la production mondiale du pétrole brut.....	2
I.1. Réserves mondiales de pétrole brut .....	2
I.2. Production mondiale du pétrole brut.....	3
I.3. Demande mondiale de pétrole .....	4
II. Généralités sur le pétrole brut.....	5
II.1. Définition.....	5
II.2. Composition chimique et états physiques du pétrole brut.....	6
II.3. Naissance du pétrole brut.....	6
II.3.1. Formation et accumulation .....	6
II.3.2. Formation du kérogène .....	7
II.3.3. Formation et pyrolyse du kérogène - évolution de la matière organique en fonction de la profondeur .....	8
II.3.4. Formation des gisements de pétrole brut.....	9
II.4. Composition chimique du pétrole brut .....	10
II.4.1. Hydrocarbures .....	10
II.4.2. Autres composés présents dans le pétrole brut .....	13
II.5. Classification du pétrole brut.....	14
II.5.1. Selon la densité API.....	14
II.5.2. Selon la viscosité .....	15
II.5.3. Selon la teneur en soufre .....	16
II.5.4. Selon la composition chimique.....	16
II.5.5. Selon le facteur de caractérisation $K_{UOP}$ .....	16
II.6. Bruts de référence .....	17
II.7. Prospection et exploration pétrolière et gazière.....	18
II.7.1. Historique .....	18
II.7.2. Etapes de la prospection pétrolière .....	18
II.8. Bassins producteurs de pétrole et de gaz en Algérie .....	29
<b>CHAPITRE II. Schémas de Raffinage du Pétrole</b> .....	32
I. Raffinage en Algérie.....	32
I.1. Raffineries en Algérie .....	32
I.2. Projets de développement du raffinage en Algérie .....	33
II. Différents produits dérivés du pétrole .....	33
III. Schémas des procédés de raffinage du pétrole .....	39
III.1. Prétraitement du pétrole brut.....	39
III.2. Procédés de raffinage du pétrole .....	41
III.2.1. Procédés de SEPARATION .....	44
III.2.2. Procédés de CONVERSION .....	44
III.2.3. Procédés d'AMELIORATION .....	45
III.2.4. Mélange (blending) .....	46
IV. Risques environnementaux .....	47

<b>CHAPITRE III. Schémas de Fabrication Pétrochimique - Fabrication Industrielle du PVC</b> .....	49
I. Diversité des produits de l'industrie pétrochimique .....	49
II. Procédés de la pétrochimie .....	51
III. Exemple de procédé - Fabrication Industrielle du PVC.....	52
III.1. Définition .....	53
III.2. POLY (CHLORURE DE VINYLE) OU PVC .....	53
III.3. Fabrication du PVC .....	53
III.4. Procédé de fabrication industrielle du PVC .....	55
III.5. Types de PVC.....	55
III.6. Applications du PVC.....	55
III.7. Caractéristiques du PVC .....	56
IV. Risques environnementaux pour le secteur de la pétrochimie .....	56
<b>ANNEXE</b>	
V. Procédés de fabrication industrielle du polypropylène et du polyéthylène.....	58
V.1. Procédé industriel de fabrication du polyéthylène (PE) .....	58
V.2. Procédé industriel de fabrication du polypropylène (PP) .....	58
Références bibliographiques .....	60

## **Introduction générale**

Dans un passé lointain, d'innombrables minuscules créatures marines sont mortes et leurs corps, en s'accumulant au cours de millions d'années, ont formé des couches de sédiments. Au fil du temps, la pression et la chaleur ont transformé ces sédiments en un mélange complexe d'hydrocarbures et d'autres composés, mieux connu sous le nom d'« huile de roche » ou pétrole - du latin *petra* (roche) et *oleum* (huile).

Le pétrole est une ressource précieuse et très demandée dans le monde entier, en raison de son utilisation comme source d'énergie pour la production de chaleur et d'électricité, ainsi que pour la propulsion des véhicules et des avions. Le pétrole est une énergie fossile, utilisée notamment dans les transports et la pétrochimie. Découvert au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle en Pennsylvanie, il se présente sous la forme d'une huile minérale provenant de la décomposition sédimentaire de composés organiques contenant du carbone. Une fois extrait des gisements souterrains, le pétrole brut est transporté par des oléoducs avant d'être raffiné, c'est-à-dire transformé.

Le raffinage est le processus par lequel le pétrole brut est transformé en différents produits raffinés - tels que l'essence, le diesel, le kérosène et le fioul domestique - en séparant et en purifiant les différentes coupes pétrolières.

La pétrochimie, cette science qui permet de transformer le pétrole brut en matières plastiques, joue un rôle essentiel. De nombreux objets de la vie quotidienne (bouteilles, chaussures, DVD, etc.) sont produits à partir de dérivés du pétrole.

Dans ce contexte, ce polycopié est divisé en trois chapitres :

- Le premier chapitre, intitulé « Formation et Exploitation du Pétrole et Gaz naturel », présente des notions fondamentales sur l'origine du pétrole et du gaz naturel, leur composition, les propriétés et la classification des bruts, les gisements et les caractéristiques des pétroles, l'exploration pétrolière, les techniques d'exploitation (le forage), etc. La compréhension de ces éléments est cruciale pour la suite de cette étude.
- Le deuxième chapitre, nommé « Schémas de Raffinage du Pétrole », se concentre sur les procédés de raffinage et de transformation des hydrocarbures en produits finis.
- Le troisième et dernier chapitre, intitulé « Schémas de Fabrication Pétrochimique », est consacré à l'étude des procédés de la pétrochimie, en donnant un exemple sur la fabrication industrielle du poly(chlorure de vinyle) (PVC).

## CHAPITRE I.

## Formation et Exploitation du Pétrole et du Gaz Naturel

 Introduction

Le **pétrole** est l'une des matières premières les plus recherchées actuellement dans le monde, vu son utilisation dans tous les secteurs industriels stratégiques tels que les transports, la chimie, l'agriculture, le bâtiment, les travaux publics, les textiles, l'électricité, etc. C'est un combustible fossile dont la formation date d'environ 20 à 350 millions d'années.

Aujourd'hui, le pétrole est indispensable pour le développement économique, énergétique et technologique d'un pays. C'est une énergie essentielle qui couvre 97 % des besoins en carburants, conséquence de l'utilisation massive des moteurs thermiques.

Comme le pétrole est un liquide, il est facile à extraire, à transporter, à stocker et à utiliser.

**I. Statistiques sur les réserves et la production mondiale du pétrole brut****I.1. Réserves mondiales de pétrole brut**

Les « réserves » de pétrole désignent le plus souvent l'ensemble des quantités de pétrole que l'on est sûrs de pouvoir extraire.

Les cinq pays disposant des plus importantes réserves prouvées de pétrole au monde à la fin de l'année 2023 sont :

- **Le Venezuela** avec 303,8 milliards de barils de pétrole, soit 17,8% des réserves prouvées mondiales ;
- **L'Arabie saoudite** avec 258,6 milliards de barils ;
- **L'Iran** avec 208,6 milliards de barils ;
- **Le Canada** avec 170,3 milliards de barils ;
- **L'Irak** avec 145 milliards de barils.

D'après les dernières estimations annuelles de la revue hebdomadaire américaine Oil and Gas Journal, les réserves mondiales prouvées de pétrole brut ont augmenté d'environ 0,4 % en 2023, pour atteindre 239 milliards de tonnes au 1<sup>er</sup> janvier 2024. Cela représente environ 50 années de production au rythme actuel<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Source : CPDP • N.I.E. n° 975 comité professionnelle du pétrole. NIE-975-Prod-mondiale-petrole-brut-et-reserves. 2024.

Le **Venezuela**, avec des réserves étales, est resté le premier pays au monde en termes de réserves pétrolières (en incluant les pétroles bruts extra-lourds).

1. **En Afrique**, les plus grosses réserves se trouvent en Libye, au Nigeria, en **Algérie**, en Angola, au Soudan, en Égypte, au Congo-Brazzaville, en Ouganda, au Gabon, et au Tchad. L'**Algérie** arrive à la **3<sup>e</sup> place** derrière la Libye et le Nigeria.
2. L'**Algérie** dispose de richesses naturelles considérables et diversifiées, notamment en hydrocarbures. Selon les données de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) les réserves de pétrole de l'Algérie, à partir de 2021, s'élèvent à 12,2 milliards de barils.<sup>2</sup> Ce chiffre la place à la **16<sup>e</sup> place** du classement mondial des 20 plus grandes réserves de pétrole.

### I.2. Production mondiale du pétrole brut<sup>3</sup>

La production mondiale de pétrole brut et de condensats devrait être en hausse d'environ 1,6 % par rapport à 2022, atteignant 4,75 milliards de tonnes en 2023 (**Figure I.1**).

La production des **États-Unis** a augmenté de 8 %, à 961 millions de tonnes. Elle a représenté plus de 20 % de la production mondiale, ce qui a placé ce pays à nouveau **en tête des producteurs** mondiaux de pétrole brut.

La production des pays membres de l'OPEP a baissé de 1,8 %, à 1,67 milliard de tonnes, et la part de l'OPEP dans le total mondial s'est établie à 35,2 %.

L'**Arabie saoudite** a vu ses volumes reculer de 4 %, conséquence de ses décisions de réduire sa production afin de soutenir les cours mondiaux du pétrole brut. Elle a produit 12,2 % de la production mondiale en 2023, demeurant à la 2<sup>e</sup> place des producteurs mondiaux de pétrole brut.

Au sein de l'OPEP, l'**Iran** a enregistré une hausse de 3 % et a conservé sa 8<sup>e</sup> position.

Le **Venezuela**, quant à lui, avec des volumes en progression de 8 %, a gagné une place en un an et est ainsi devenu le 21<sup>e</sup> producteur mondial, tout en conservant sa première place dans les réserves pétrolières.

La **Russie**, malgré un repli de 2 % de sa production, a conservé sa 3<sup>e</sup> position en 2023, derrière l'Arabie saoudite et les États-Unis.

En **Europe** (y compris la Russie), la production a régressé d'environ 1 %, à 833 millions de tonnes, soit 17,5 % de la production mondiale.

En 2025, la production mondiale de pétrole devrait atteindre environ 104,8 à 105,7 millions de barils par jour (mb/j), avec une hausse estimée entre 1,3 et 1,9 million de barils par jour par

<sup>2</sup> Source : Publié le 3 janvier 2023 par ALGERIE ECO.

<sup>3</sup> Source : CPDP • N.I.E. n° 975 comité professionnelle du pétrole. NIE-975-Prod-mondiale-petrole-brut-et-reserves.

rapport à 2024. Cette augmentation est principalement soutenue par la forte demande dans les secteurs du transport aérien, de la mobilité routière, de l'industrie, de la construction et de l'agriculture<sup>4</sup>.

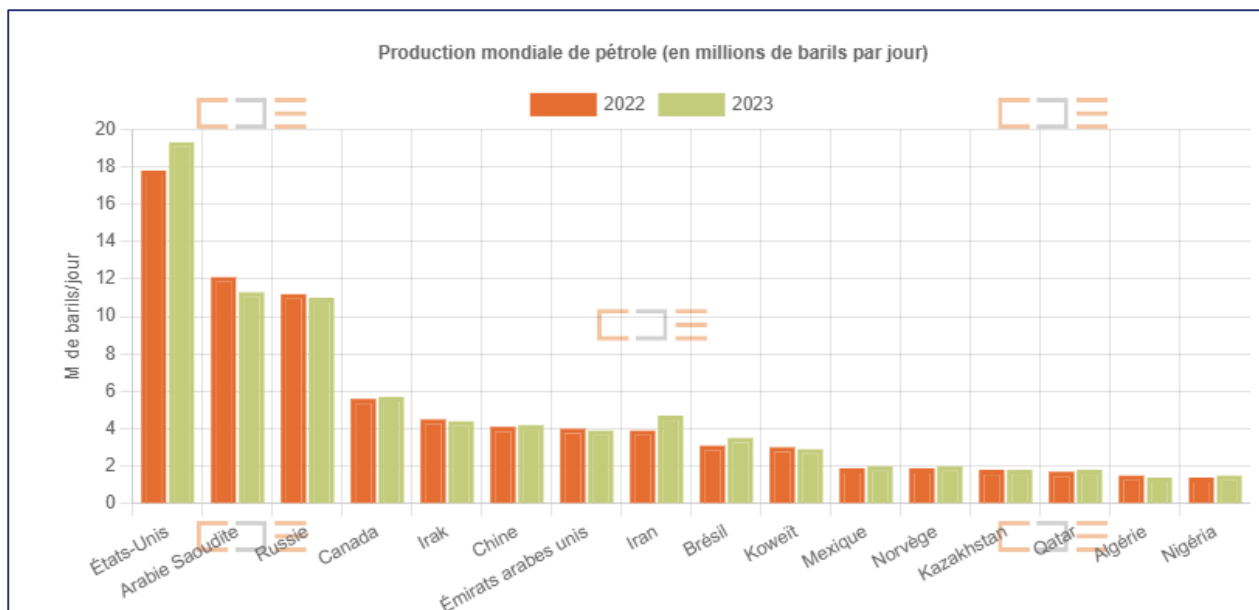


Figure I.1. Production mondiale du pétrole brut (2022-2023).<sup>5</sup>

### I.3. Demande mondiale de pétrole

La demande mondiale de pétrole continue de croître en 2025, portée principalement par les économies asiatiques, notamment la Chine et l'Inde. Selon les dernières prévisions de l'OPEP, la consommation mondiale devrait atteindre 105,2 millions de barils par jour (mb/j) en 2025, contre 103,75 mb/j en 2024, soit une hausse de 1,4 million de barils par jour. Cette progression est stimulée par la forte demande dans les secteurs du transport aérien, de la mobilité routière, de l'industrie, de la construction et de l'agriculture, avec l'Asie représentant l'essentiel de la croissance<sup>6</sup>.

L'Agence internationale de l'énergie (AIE) propose une estimation légèrement inférieure, prévoyant que la demande atteindra près de 104 mb/j en 2025, avec une croissance de 1,1 million de barils par jour par rapport à 2024. L'AIE souligne que près de 60 % de cette augmentation proviendra des pays asiatiques, principalement la Chine, où la demande pétrochimique est particulièrement dynamique. En revanche, la demande dans les pays de l'OCDE devrait reprendre son déclin structurel après une légère hausse en 2024<sup>7</sup>.

<sup>4</sup> Source : <https://www.aps.dz/economie/184072-petrole-l-opep-maintient-sa-prevision-de-croissance-de-la-demande-en-2025>.

<sup>5</sup> Source: The Energy Institute Statistical Review of World Energy - Graphique: Selectra.

<sup>6</sup>Source : <https://www.aps.dz/economie/181708-l-opep-prevoit-une-croissance-de-la-demande-de-petrole-en-2025-et-en-2026>.

<sup>7</sup>Source : <https://www.connaissancesdesenergies.org/afp/la-croissance-de-la-consommation-mondiale-de-petrole-devraits'accelerer-en-2025-selon-laie-250313>.

Pour l'année 2026, l'Organisation prévoit également une hausse de la consommation mondiale de pétrole qui serait de l'ordre de 1,43 mb/j pour un total de 106,63 mb/j.

### 🔗 En résumé :

- Demande mondiale prévue en 2025 :
  - OPEP : 105,2 mb/j
  - AIE : environ 104 mb/j
- Croissance annuelle estimée : +1,1 à +1,4 mb/j
- Principaux moteurs : Chine, Inde, autres pays d'Asie, soutenus par le Moyen-Orient et l'Amérique latine.
- Secteurs clés : Transport, industrie, pétrochimie.

### ❶ La **production** pétrolière obtenue par produit est la suivante : <sup>8</sup>

- 25 % pour les produits légers ;
- 35 % pour les produits moyens ;
- 40 % pour les produits lourds.

### ❷ La **demande** mondiale en produits pétroliers se répartit approximativement ainsi :

- 40 % pour les produits légers (essence) ;
- 40 % pour les produits moyens (fioul, gazole) ;
- 20 % pour les produits lourds (cires, bitumes).

Le seul pétrole brut comportant à peu près ces proportions avant raffinage est le brut léger du Sahara algérien, appelé « Saharan Blend ».

Tous les autres bruts extraits dans le monde contiennent davantage de produits lourds. Pour passer d'une répartition à une autre, il faut donc convertir en partie les produits lourds en produits légers avant de les mettre sur le marché.

## II. Généralités sur le pétrole brut

### II.1. Définition

Le terme « **pétrole** » vient du latin *petra oleum*, qui signifie littéralement « huile de pierre ». C'est une huile inflammable, variant de la couleur jaune à la couleur noire, en fonction de sa composition et de sa densité (**Figure I.2**).

---

<sup>8</sup> Source: BP statistical Review.



**Figure I.2.** Échantillons de pétrole brut, variant du jaune doré au noir charbon.<sup>9</sup>

Le pétrole est défini comme une huile minérale naturelle, accumulée en gisements et utilisée comme source d'énergie, notamment sous forme d'essence. C'est un combustible fossile dont la formation date d'environ 20 à 350 millions d'années.

Il provient de la décomposition d'organismes (principalement du plancton) accumulés dans les bassins sédimentaires, au fond des océans et des lacs. Son exploitation est l'un des piliers de l'économie industrielle contemporaine, car il fournit la quasi-totalité des carburants liquides. Le pétrole est souvent appelé aussi « or noir », en référence à sa couleur, due aux constituants lourds ( $C \geq 20$  ont cette nuance), ainsi qu'à son coût élevé.

## II.2. Composition chimique et états physiques du pétrole brut

Le pétrole désigne un liquide composé principalement de *molécules d'hydrocarbures* (formées uniquement de carbone et d'hydrogène) et de molécules lourdes plus complexes, contenant également d'autres atomes, principalement du soufre, de l'azote et de l'oxygène, appelées résines ou asphaltènes.

Certains de ses constituants sont, à température et pression ambiantes :

- gazeux (méthane, propane, etc.) ;
- liquides (hexane, heptane, octane, benzène, etc.) ;
- parfois solides (paraffines, asphaltes, etc.).

## II.3. Naissance du pétrole brut

### II.3.1. Formation et accumulation

De nombreux savants se sont penchés sur l'origine du pétrole. Deux théories sont nées : celle de l'origine minérale et celle de l'origine organique. C'est cette dernière théorie qui est considérée aujourd'hui comme la plus vraisemblable.

<sup>9</sup> Source : <https://bestongroup.com/ar/industry-news/is-pyrolysis-oil-light-or-heavy-knowing-api-gravity/>.

Le pétrole et le gaz résultent de la *dégradation thermique de matières organiques animales ou végétales* contenues dans certaines roches, appelées roches-mères. La matière organique est issue d'êtres vivants (plancton, végétaux, animaux, etc.). Composée pour l'essentiel de carbone, d'hydrogène, d'azote et d'oxygène, elle forme ce que l'on appelle « la biomasse ».

Cette biomasse est généralement détruite par des bactéries, mais une faible partie (moins de 1 %) se dépose au fond de milieux aquatiques. Dans cet environnement pauvre en oxygène, la matière organique est en partie préservée. Elle se mélange ensuite à des matières minérales (particules d'argiles ou sables fins), créant ainsi des boues de sédimentation. Celles-ci s'accumulent par couches successives, sur des dizaines, voire des centaines de mètres.

### II.3.2. Formation du kérogène

La transformation de la matière organique en pétrole s'échelonne sur des dizaines de millions d'années - en passant par une substance intermédiaire appelée *kérogène*.

Le *kérogène* (du grec signifiant « qui engendre la cire ») est une substance solide correspondant à l'état intermédiaire entre la matière organique et les combustibles fossiles.<sup>10</sup>



La matière organique se serait ainsi accumulée au fond des mers, des océans, des lacs et des deltas, mélangée à des matières minérales (particules d'argiles ou sables fins), créant ainsi des boues de sédimentation et formant le « *sapropel* ». La pression, développée au fur et à mesure par l'accumulation des sédiments au cours des temps géologiques, la température, ainsi que l'action des bactéries en milieu réducteur, c'est-à-dire en absence d'oxygène, auraient petit à petit transformé ce « *sapropel* » en pétrole.

Le *sapropel* est un terme utilisé en géologie marine pour désigner des sédiments de couleur foncée riches en matière organique. Ce mot vient du grec ancien *sapros* (putréfaction) et *pelos* (boue), ce qui signifie littéralement « boue putréfiée ».<sup>11</sup>

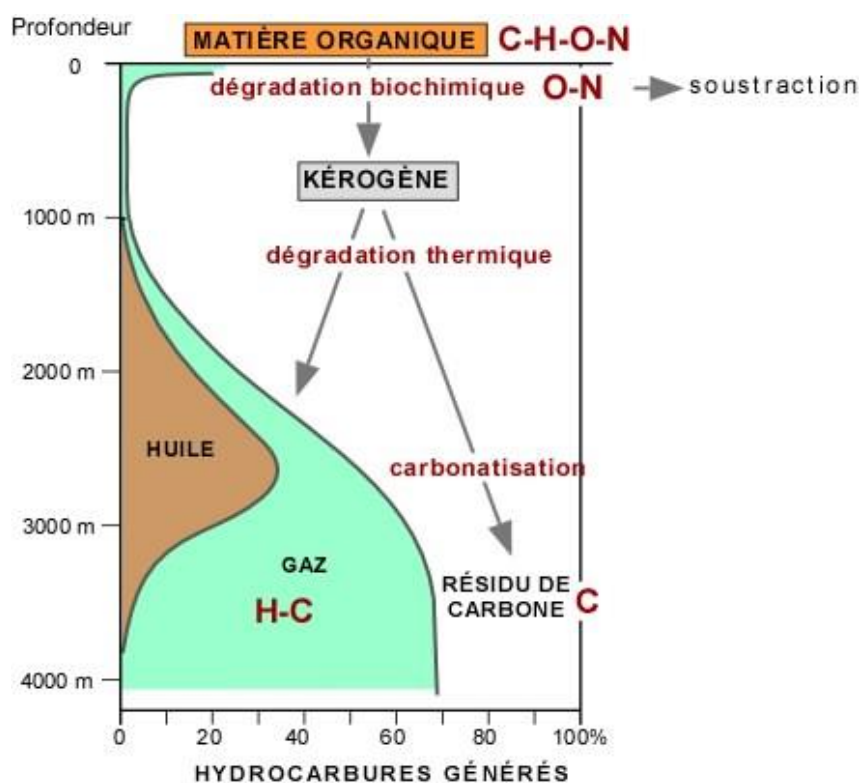


<sup>10</sup> Source : <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/developpement-durable-kerogene-13065/>

<sup>11</sup> Source : <https://www.ecolotus.lt/en/about-sapropel/>

### II.3.3. Formation et pyrolyse du kérogène - évolution de la matière organique en fonction de la profondeur

- ❶ La *diagenèse* correspond à l'enfouissement des sédiments emprisonnant la matière organique à de grandes profondeurs, où celle-ci subit une dégradation thermique (la température augmente d'environ 3 °C tous les 100 mètres). À partir de 1 000 mètres de profondeur, et pour une température comprise entre 50 et 120 °C, en l'absence d'oxygène, le kérogène commence à se transformer en pétrole et en gaz naturel. Cette transformation est appelée « pyrolyse ». Ce processus chimique élimine l'azote et l'oxygène résiduels, pour ne laisser que de l'eau, du CO<sub>2</sub> et des hydrocarbures, molécules exclusivement composées de carbone et d'hydrogène. Le mélange d'hydrocarbures liquides ainsi formé est appelé pétrole brut.
- ❷ C'est entre 2 000 et 3 000 mètres que la proportion de pétrole est la plus importante (cf. schéma ci-dessous : **Figure I.3**) ; les pétroliers appellent cet intervalle la « fenêtre à huile ».
- ❸ À des profondeurs plus importantes, on ne retrouve plus que du gaz et des résidus de carbone. Il est à noter que le pétrole ne se forme jamais seul, mais toujours avec du gaz naturel.



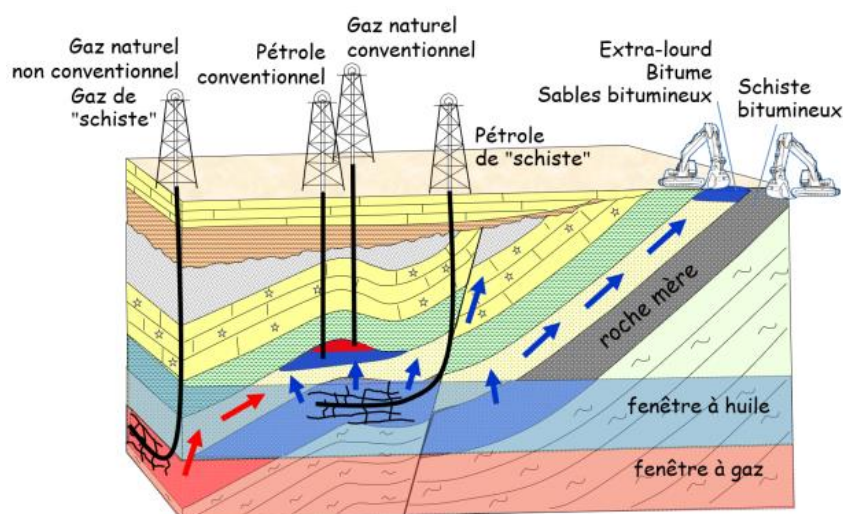
**Figure I.3.** Diagramme décrivant schématiquement la transformation de la matière organique en pétrole, gaz naturel, charbon au cours de son enfouissement dans la croûte terrestre à travers les âges géologiques<sup>12</sup>.

<sup>12</sup> Source : © P-A Bourque Uni. Laval Québec

### II.3.4. Formation des gisements de pétrole brut

La partie du sous-sol dans laquelle s'est formé le pétrole est appelée **roche mère**. Une fois formé, il est soumis à plusieurs forces : le poids des sédiments, les forces géologiques, les différences de densité avec l'eau salée qui l'accompagne, etc.

Dans le but de réduire l'effet de ces forces, le pétrole a tendance à se déplacer vers d'autres endroits en empruntant un chemin à travers les roches les plus perméables ou les fissures existant à l'intérieur de ces roches. Cette migration s'effectue de la roche mère vers la surface de la Terre, en traversant les sédiments (**Figure I.4**) ; cela est dû au fait que la densité du pétrole est plus faible que celle de l'eau. L'endroit où s'arrête la migration du pétrole est appelé « piège ».



**Figure I.4.** Schéma illustrant la formation et la migration des hydrocarbures dans le sous-sol, et leur exploitation. <sup>13</sup>

☞ Un **piège** comporte (**Figure I.5**) :

Une *roche poreuse* dans laquelle s'accumule le pétrole, c'est ce que l'on appelle la « roche magasin » ou « roche réservoir ».

Au-dessus de cette « roche magasin », une couche suffisamment imperméable pour empêcher le pétrole de migrer vers la surface ; c'est ce que l'on appelle la « roche couverture » ou également « roche imperméable », comme une couche de sel, par exemple.

L'ensemble des roches mères et des roches réservoirs constitue ce que l'on appelle un *gisement pétrolier*. Dans ce réservoir poreux, le gaz s'accumule au-dessus du pétrole brut,

<sup>13</sup> Source : <https://aspoFrance.org/2016/10/11/environnement/>

lequel se retrouve au-dessus de l'eau, en raison des densités respectives de ces produits (le gaz naturel est plus léger que le pétrole, lui-même plus léger que l'eau).

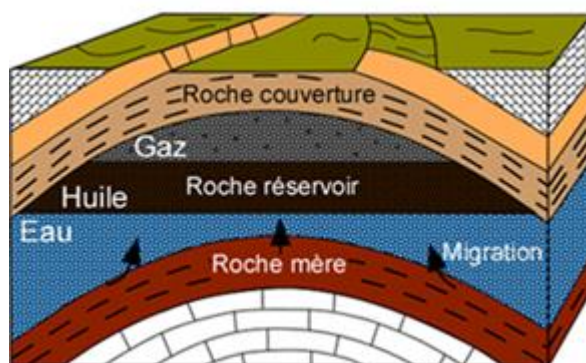


Figure I.5. Schéma simplifié d'un gisement de pétrole.<sup>14</sup>

## II.4. Composition du pétrole brut

Le pétrole brut est un mélange liquide complexe d'hydrocarbures, c'est-à-dire de combinaisons chimiques de carbone (C) et d'hydrogène (H). Il contient également de faibles quantités de soufre, ainsi que des traces d'azote, d'oxygène et de métaux.

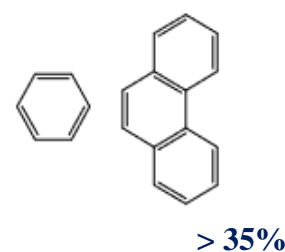
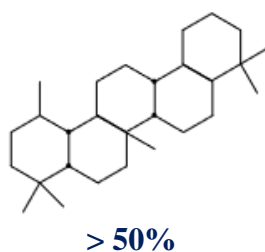
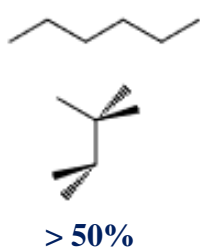
NB : Il existe divers types de pétrole brut - plus de 400 types dans le monde.

### II.4.1. Hydrocarbures<sup>15</sup>

Le pétrole brut est formé essentiellement d'hydrocarbures, c'est-à-dire de combinaisons exclusives de carbone et d'hydrogène. Le carbone représente 83 à 87 % en volume, tandis que l'hydrogène en constitue 10 à 14 %.

Les hydrocarbures contenus dans le pétrole sont regroupés en trois familles :

- ① Les **paraffines** (alcanes)      ② Les **naphènes** (cycloalcanes)      ③ Les **aromatiques**



① - Les **paraffines (alcanes)** : représentent entre **20 et 65 %** du pétrole brut. Ce sont des hydrocarbures saturés ayant la formule  $C_nH_{2n+2}$ , où  $n$  représente le nombre d'atomes de carbone dans la chaîne hydrocarbonée. Ils peuvent se présenter sous forme de **chaînes droites** (alcanes

<sup>14</sup> Source : [https://www.senat.fr/rap/r13-174/r13-174\\_mono.html](https://www.senat.fr/rap/r13-174/r13-174_mono.html)

<sup>15</sup> Source : Raffinage du pétrole Tome 1. Pétrole brut. Produits pétroliers. Schémas de fabrication De Jean-Pierre Wauquier.

linéaires) ou **ramifiées** (alcane iso). Le **Tableau I.1** regroupe les températures d'ébullition et les densités des quatre premiers alcanes ( $1 \leq n \leq 4$ ).

**Tableau I.1.** Tableau des propriétés physiques (températures d'ébullition et densité) des quatre premiers alcanes.

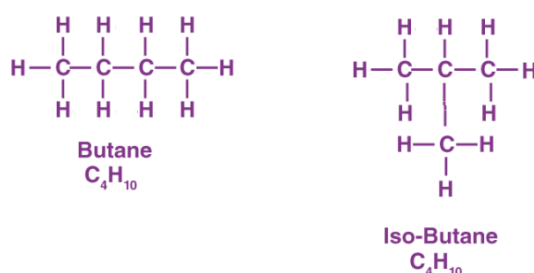
Paraffines	Formule globale	Température d'ébullition (°C)	Densité
Méthane	CH <sub>4</sub>	- 161,5	0,260
Ethane	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	- 88,6	0,377
Propane	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	- 42,1	0,508
n-Butane	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	- 0,5	0,585
Isobutane	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	- 11,7	0,563

D'après le **Tableau I.1**, on peut généraliser les règles suivantes aux autres familles de composés :

1. Plus la chaîne carbonée d'un composé organique est longue, plus ses températures de changement d'état (fusion et ébullition) sont élevées.
2. À masse molaire égale, les températures d'ébullition et de fusion sont d'autant plus faibles que l'alcane est ramifié.
3. Plus la chaîne carbonée d'un alcane linéaire gazeux est longue, plus sa densité par rapport à l'air est grande.
4. Plus la chaîne carbonée d'un alcane linéaire liquide est longue, plus sa densité par rapport à l'eau est grande.

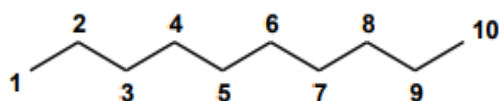
On distingue deux types de paraffines : les *alcane normaux* et les *alcane isomères*.

**Exemples :**



**A- Les paraffines normales (n-paraffines) :** possèdent une chaîne carbonée linéaire, sans ramification.

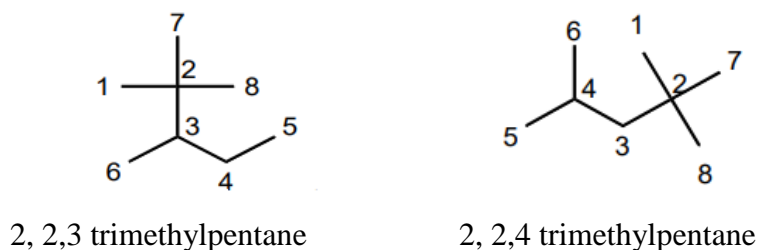
**Exemple : n-décane**



**B- Les isoparaffines** : la chaîne de carbones est une chaîne ramifiée ou branchée (ce sont des *isomères des paraffines normales*, que l'on différencie par l'utilisation du préfixe iso). Le premier composé de la série des isoparaffines est l'isobutane.

Pour la nomenclature, on considère la chaîne droite la plus longue et on repère les positions des chaînes ramifiées en numérotant les carbones de la chaîne principale de gauche à droite.

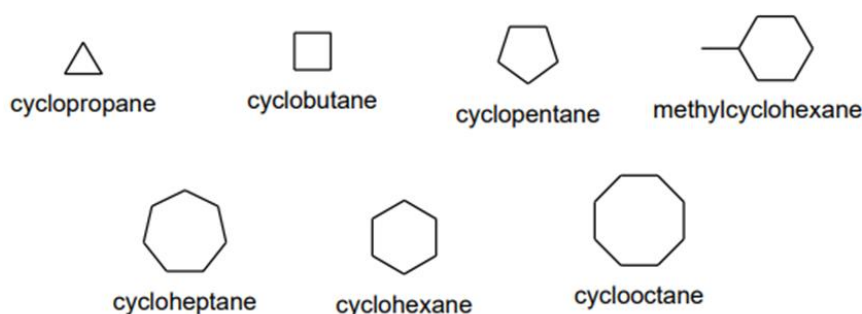
**Exemples** : la figure ci-dessous présente deux isomères de l'isooctane (8 carbones), qui compte au total 18 isomères.



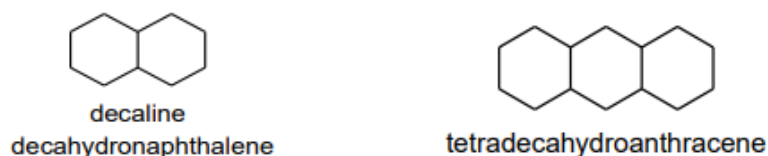
② - Les **naphènes (cycloalcanes)** : formule générale  $C_nH_{2n}$ , ils représentent entre **25 et 90 %** du pétrole brut. Ce sont des *hydrocarbures cycliques saturés* dont les appellations sont celles des paraffines précédées du préfixe *cyclo-*. Dans ces hydrocarbures, le nombre d'atomes de carbone du cycle peut varier. Ils présentent des températures d'ébullition et des masses volumiques supérieures à celles des alcanes ayant le même nombre d'atomes de carbone.

Dans les pétroles bruts, les cycles les plus fréquemment rencontrés sont ceux à cinq ou six atomes de carbone. Dans ces cycles, chaque atome d'hydrogène peut être substitué par une chaîne paraffinique droite ou ramifiée.

**Exemples** :

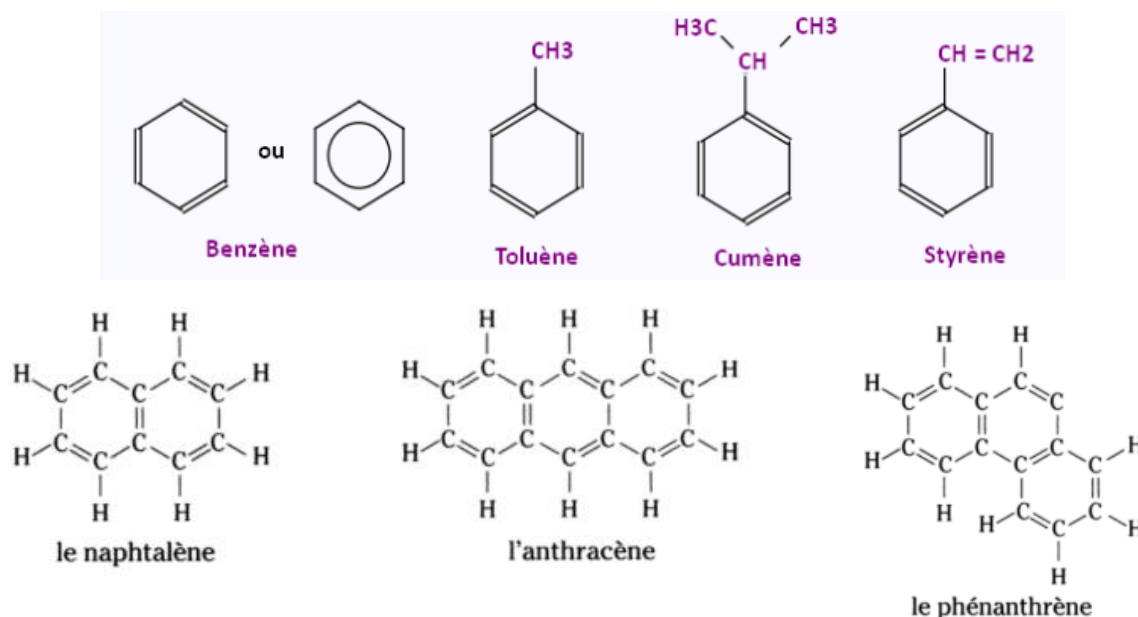


On trouve également des naphènes constitués par la juxtaposition de deux cycles - ou plus - comportant chacun six atomes de carbone.



③ - Les **Aromatiques (benzènes)** : formule générale  $C_nH_{2n-6}$ , ils représentent entre **5 et 25 %** du pétrole brut. Ce sont des *hydrocarbures cycliques polyinsaturés*, présents en forte concentration dans les pétroles bruts. La présence, dans leur structure, d'au moins un cycle comportant trois doubles liaisons conjuguées leur confère des propriétés remarquables. En effet, les premiers composés de cette famille (benzène, toluène, xylène) constituent des matières premières fondamentales de la pétrochimie.

**Exemples :**



**NB :** Les hydrocarbures insaturés (à double liaison et triple liaison) ne sont pas présents dans le pétrole brut.

#### II.4.2. Autres composés présents dans le pétrole brut

- Les **composés soufrés** (0,05 % à 6 % en masse)

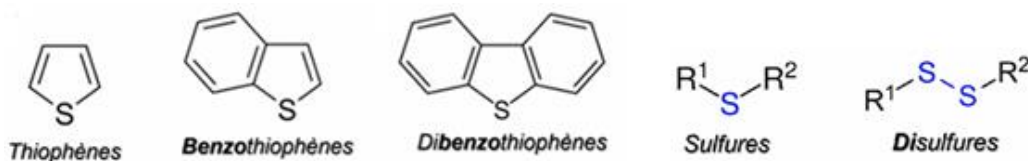
Les composés soufrés sont présents dans le pétrole brut sous forme de composés organiques soufrés, le sulfure d'hydrogène  $H_2S$  est le seul composé non organique présent dans le brut.

- Le **sulfure d'hydrogène ( $H_2S$ )**, ou hydrogène sulfuré, est un polluant courant des sites des usines pétrolières et gazières à l'origine de pertes économiques s'élevant à plusieurs milliards d'euros chaque année.

La présence des composés soufrés dans le brut est nuisible à cause de leurs caractères corrosifs. Les composés organiques soufrés sont généralement classés en deux groupes les composés acides et les composés non acides.

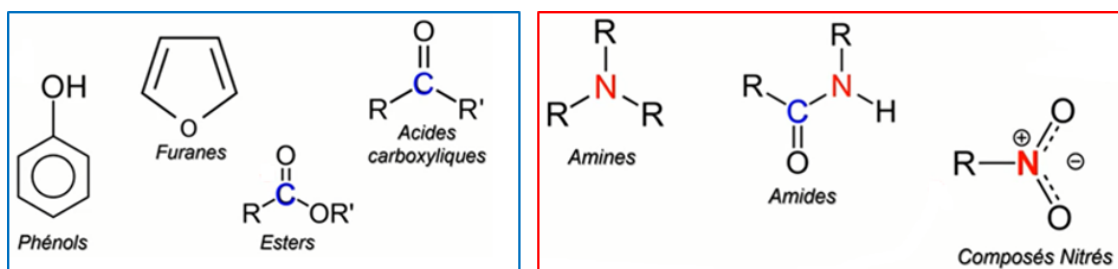
- Les composés **acides R-SH** : sont les thiols (mercaptans) ; composés corrosifs de forte odeur.

- Les composés **non acides** : Ce sont les thiophènes, les sulfides et les disulfides.



☞ **Remarque** : Les composés non acides sont non corrosifs et peu odorants.

- Les **composés oxygénés** : de 0,05 à 1,5 % en masse.
- Les **composés azotés** : de 0,1 à 2 % en masse.



Les oxygénés

Les azotés

- Les **métaux** représentent de 0,005 à 0,015 % en masse (dont 75 % sont du nickel et du vanadium). On peut également trouver du sodium, du calcium, du magnésium, de l'aluminium et du fer.

## II.5. Classification du pétrole brut

Tout processus de formation est unique : un gisement de pétrole contient un mélange d'hydrocarbures qui le caractérise selon l'histoire géologique de la zone où il s'est développé. La provenance géographique est donc un des critères de classification du pétrole (Golfe Persique, mer du Nord, Venezuela, Nigéria, etc.).

Toutefois, pour établir des comparaisons entre différents sites, d'autres critères existent. Les plus importants sont les mesures de la **viscosité**, de la **teneur en soufre** et de la **composition chimique** du pétrole brut.

### II.5.1. Selon la densité API

La **densité API** est une échelle exprimant la densité du pétrole brut en degrés API. Cette échelle ne fournit ni plus ni moins d'informations que la densité elle-même et ne respecte pas le système international d'unités (SI), mais *elle permet d'obtenir des chiffres plus faciles à retenir*. Elle est utilisée pour différencier les types de pétrole en fonction de leur densité relative à celle de l'eau, et se calcule selon la formule suivante <sup>16</sup>:

<sup>16</sup> Dans les pays Anglo-saxons, on mesure la specific gravity (sp.gr) qui signifie la densité.

$$^{\circ}\text{API} = \frac{141,5}{\text{densité à } 60\text{F}} - 131,5$$

.....Equation N°1

- 60°F<sup>17</sup> = 15,5°C env.

- La température en °F est donnée par : T en °F = 1,8 (T en °C) + 32

- Un pétrole est qualifié de **léger (light)** si son degré API est supérieur à 31,1° ;
- de **moyen (medium)** s'il est compris entre 22,3° et 31,1° ;
- de **lourd (heavy)** s'il est compris entre 10° et 22,3° ;
- et d'**extra lourd** s'il est inférieur à 10°.

Ces bruts « conventionnels » sont extraits par forage. Les pétroles les plus légers sont les plus demandés par les raffineurs, car ils fournissent directement beaucoup de coupes légères à forte valeur marchande (diesel, essence, naphta).

### II.5.2. Selon la viscosité

Quatre types de gisements sont définis (léger, moyen, lourd ou extra-lourd, et bitume). Plus le pétrole brut est visqueux, plus il est « lourd » :

1. **Les gisements de pétrole léger** : l'aspect du pétrole brut se rapproche de celui du gazole. Les gisements sahariens présentent cette caractéristique.
2. **Les gisements de pétrole moyen** : la viscosité du pétrole brut est intermédiaire entre celle du pétrole léger et du pétrole lourd. Il s'agit, par exemple, des gisements du Moyen-Orient.
3. **Les gisements de pétrole lourd ou extra-lourd** : le pétrole brut ne coule pratiquement pas à température ambiante. Les gisements d'Amérique du Sud en sont un exemple.
4. **Les gisements de bitume** : le pétrole brut est très visqueux, voire solide à température ambiante. Les principales réserves de ce type se trouvent au Canada.

Le bitume est utilisé comme liant pour la fabrication de nombreux revêtements, tels que des routes, des parkings, des trottoirs ou encore des matériaux.

☞ Cette propriété (la viscosité) est importante pour déterminer la rentabilité de l'exploitation. En effet, un pétrole peu visqueux, ou léger, est plus facile à extraire et à traiter qu'un pétrole lourd.

---

<sup>17</sup> Degrés Fahrenheit (°F).

### II.5.3. Selon la teneur en soufre

La teneur en soufre distingue le pétrole brut en deux catégories :

- **doux** (faible teneur en soufre) ;
- **sulfuré** (ou acide) dans le cas contraire.

Des gisements de pétrole doux sont notamment trouvés en Afrique, tandis que ceux de pétrole sulfuré se situent principalement en Amérique du Nord.

Un brut peut être classé selon sa teneur en soufre en cinq catégories :

1. TBTS (très basse teneur en soufre) ;
2. BTS (basse teneur en soufre) ;
3. MTS (moyenne teneur en soufre) ;
4. HTS (haute teneur en soufre) ;
5. THTS (très haute teneur en soufre).

### II.5.4. Selon la composition chimique

Les pétroles peuvent également être classés selon leur origine et donc leur composition chimique. On distingue alors trois grandes catégories :

1. **Pétroles à prédominance paraffinique** : les hydrocarbures linéaires sont les plus abondants (> 50 %). Ces bruts sont les plus recherchés, car ils donnent directement une grande proportion de produits légers comme l'essence et le gasoil.
2. **Pétroles à prédominance naphhténique** : contenant beaucoup d'hydrocarbures à cycle saturé (> 50 %).
3. **Pétroles à prédominance aromatique** : les hydrocarbures présentant un cycle carboné insaturé sont plus abondants (> 35 %).

### II.5.5. Selon le facteur de caractérisation KUOP<sup>18</sup>

Le facteur de caractérisation KUOP a été introduit par les chercheurs de la société « Universal Oil Products Co ». C'est une relation mathématique simple qui relie la densité du produit pétrolier pur à sa température d'ébullition moyenne, afin d'obtenir des courbes se superposant au mieux à celles des différentes familles (**Figure I.6**).

$$KUOP = \frac{\sqrt[3]{T \text{ en } ^\circ R}}{\text{densité à } 60^\circ F}$$

.....Equation N°2

<sup>18</sup> Le Kuop est également nommé « facteur de Watson ».



2. **Le Brent** : (38 °API et 0,3 % S) – C’est un brut léger et non soufré issu de champs de la Mer du Nord. D’après l’International Petroleum Exchange, où le prix du Brent est coté, ce prix est utilisé pour fixer le prix des deux tiers des pétroles bruts vendus mondialement.

3. **Le Dubaï Light** : (environ 32 °API et 2 % S) – Un brut léger et sulfuré du golfe Persique, utilisé comme référence pour fixer le prix de vente d’autres bruts de la région à destination de l’Asie et du Moyen-Orient.

**NB** : Le brut algérien, appelé « Sahara Blend », est un mélange de bruts issus de plusieurs champs de la région de Hassi Messaoud, dont la densité est comprise entre 43 et 47 °API. C’est un brut léger, avec une teneur en soufre de 0,1 %, soit une faible teneur en soufre

## **II.7. Prospection et exploration pétrolière et gazière**

### **II.7.1. Historique**

Le pétrole est une ressource exploitée depuis l’Antiquité. Cependant, son usage restait très restreint, car seuls les gisements de surface étaient exploités. Depuis trois mille ans, le pétrole était utilisé pour le bitume et le mortier dans la construction.

Au cours du Moyen Âge, les Byzantins puis les Vénitiens utilisèrent le pétrole comme arme (feux grégeois et bombes).

Au cours de la seconde révolution industrielle, l’intérêt pour le pétrole devint important à la suite de nombreuses innovations. Celui-ci s’avéra être un combustible de bonne qualité pour l’éclairage, mais aussi une matière première pour de nombreux produits. L’apparition du moteur à explosion entraîna le développement de pétroles de meilleure qualité.

Dès lors, le pétrole devint très convoité. De nombreuses recherches visant à localiser les différents gisements eurent lieu, et l’on procéda aux premiers forages souterrains en 1857 : c’est le début de la ruée vers l’or noir. Les premières compagnies se créèrent, et l’on prospecta dans le monde entier, sur mer et sur terre.

La prospection et l’exploration pétrolières ou gazières visent à découvrir de nouveaux gisements de gaz naturel ou de pétrole.

### **II.7.2. Etapes de la prospection pétrolière**

L’objectif de la prospection est de localiser un gisement. L’exploration doit en vérifier l’existence et en évaluer l’importance ainsi que la qualité, grâce à des forages dont l’emplacement est déterminé en associant géologie et géophysique. En cas de succès, ces deux

phases en amont sont suivies par les phases d'exploitation, de transport, de traitement et de commercialisation.

Compte tenu des coûts et des enjeux pharaoniques, l'exploitation du pétrole ne se fait pas au hasard, et la présence de pétrole ne garantit pas son exploitation. Afin de trouver du pétrole dit « exploitable », il faut d'abord localiser un piège, puis déterminer la quantité de pétrole disponible : on se demande alors si forer un puits pour l'extraire serait rentable. Il faut ainsi éviter tous forages inutiles et repérer du mieux possible les endroits du sous-sol contenant potentiellement du pétrole : c'est l'exploration pétrolière.

La première étape consiste à identifier les zones potentiellement pétrolifères en menant des études géologiques. Il faut ensuite procéder à des études géophysiques indispensables, qui permettent d'identifier les zones où il y a de fortes chances de trouver du pétrole. Ces études ne garantissent en rien la présence de pétrole ; la vérification des hypothèses s'impose avant de procéder au forage.

### ☞ Remarque

Pour qu'un gisement soit exploitable, il faut qu'il présente les caractéristiques suivantes :

- *Une roche poreuse et fissurée*, calcaire ou grès par exemple, permettant de rassembler le pétrole ;
- *Une roche imperméable*, qui arrête la remontée du pétrole et du gaz - moins denses que l'eau - et constitue un piège où le pétrole s'accumule.

### 1. Lancement par la procédure d'appel d'offres

Tout commence en général par un appel d'offres international, lancé par l'État d'un pays qui souhaite valoriser au mieux les richesses de son sous-sol, c'est-à-dire sélectionner les compagnies pétrolières qui lui présenteront les meilleures conditions. La compagnie retenue – seule ou en groupe avec d'autres – disposera d'une licence d'exploration, qu'elle utilisera dans les années suivantes.

### 2. Prospection géologique en surface

Les caractéristiques géologiques des gisements pétroliers diffèrent en fonction de leur âge (de 5 à 400 millions d'années), de leur profondeur (de 1 à 10 km) et de leur thermique (la formation de l'huile se situant entre 60 et 150 °C).

Pour identifier les régions potentiellement pétrolifères ou gazières, les géologues s'interrogent sur les points suivants :

- Quelle est la nature des roches ?
- Ont-elles été soumises à des conditions favorables à la création d'hydrocarbures ?

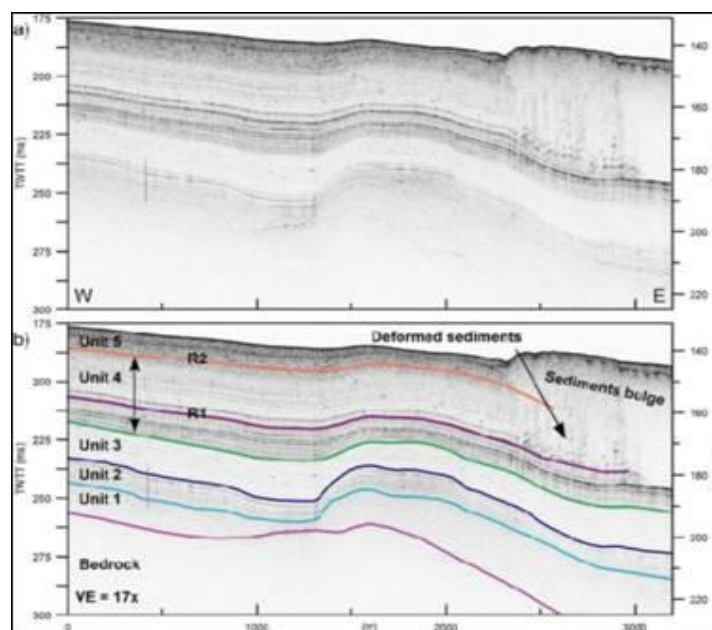
- Ces hydrocarbures ont-ils pu migrer et être piégés par des couches imperméables ?

Les géologues dressent une carte du sous-sol (**Figure I.7**) à partir des informations obtenues en surface, par examen des affleurements (**Figure I.8**), et depuis les airs, grâce à la photogéologie (technique de photo aérienne et spatiale).

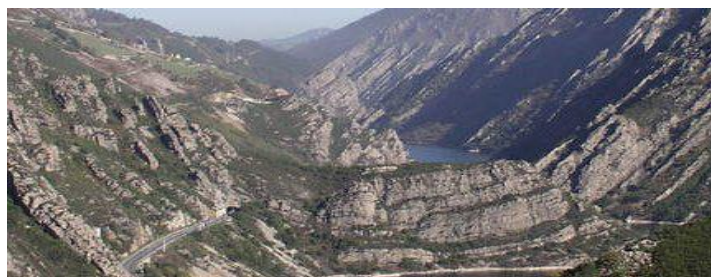
Lorsqu'une zone favorable (prospect) est repérée par les géologues depuis la surface, c'est au tour des géophysiciens d'explorer le sous-sol.

### 3. Prospection géophysique en profondeur

La sismique réflexion est la méthode principale utilisée par les géophysiciens pour repérer des gisements potentiels :



**Figure I.7.** Profil sismique et interprétation<sup>20</sup>.



**Figure I.8.** Affleurement géologique (Gorges du Verdon en France, souvent surnommées le "Grand Canyon européen) (Wikipédia).

❶ **Prospection sur terre (onshore) (Figure I.9)** se fait par chocs ou vibrations sonores : des camions dits « vibreurs » patrouillent sur des zones où les géologues estiment que la présence

<sup>20</sup> Source : Université du Québec, Laboratoire de paléomagnétisme sédimentaire.

de roches mères est probable. S'arrêtant régulièrement, ces camions ébranlent le sol en générant ainsi des ondes sismiques « artificielles ». Ces ondes se propagent dans le sous-sol, traversant, se réfléchissant et rebondissant sur certaines couches géologiques.

De nombreux capteurs, nommés « géophones », sont dispersés tout autour de la zone de prospection. Leur rôle est de réceptionner les ondes envoyées dans le sous-sol puis réfléchies. À partir des résultats, les ordinateurs peuvent ainsi modéliser les sous-sols en 3D (densité des roches, etc.).

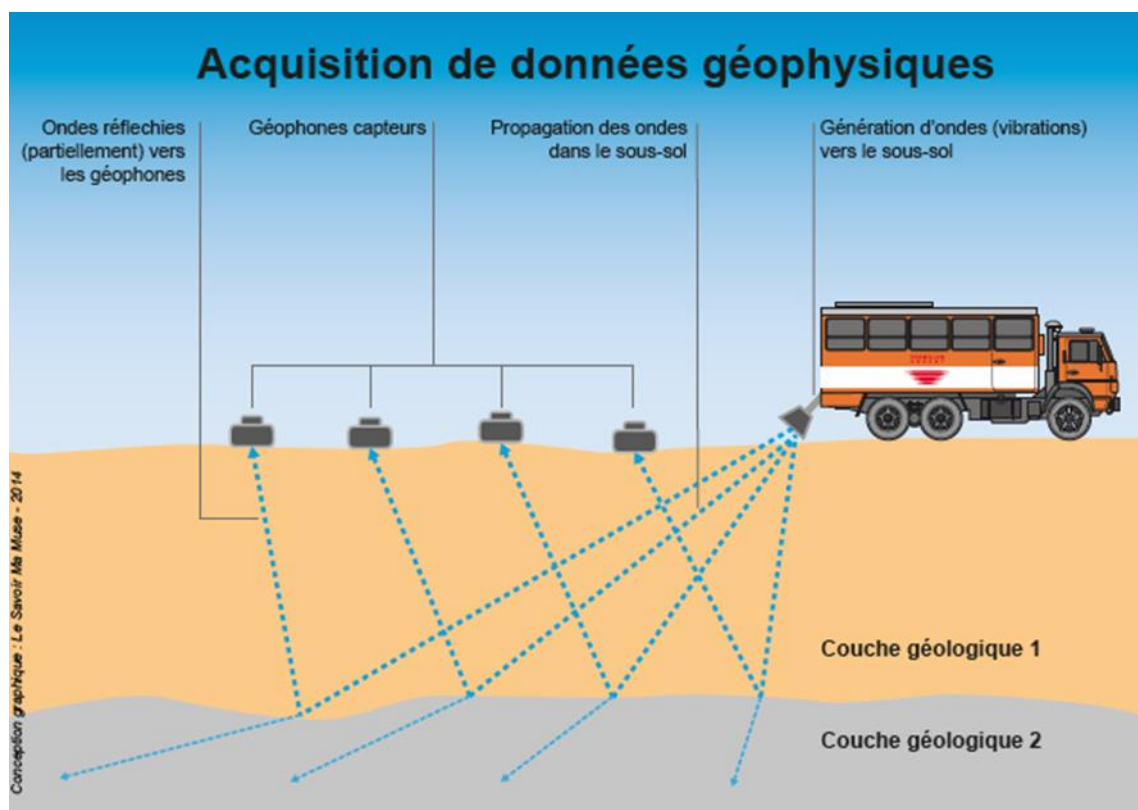


Figure I.9. Prospection sur terre « onshore ».<sup>21</sup>

❷ **Prospection en mer offshore (Figure I.10)** se réalise en produisant l'onde sismique par air comprimé à haute pression, et en recueillant les échos sur des hydrophones flottants (appelés flûtes), la couche d'eau étant considérée comme homogène.

L'exploitation des hydrocarbures s'opère à partir de plateformes fixes ou flottantes, ancrées au fond de la mer au niveau des plaines continentales (0-200 m de profondeur), aux différentes étapes de forage ou d'extraction des hydrocarbures. Certaines plateformes permettent également de transporter et de stocker les hydrocarbures.

<sup>21</sup> Source : <https://ausculterlaterre.wordpress.com/>

Grâce à des avancées technologiques, notamment dans le domaine sismique et des installations sous-marines, la production peut s'effectuer dans des zones situées à plus de 1000 m de profondeur : on parle alors d'offshore profond.

Ce type de production joue un rôle important dans l'approvisionnement mondial en énergie. En effet, il représente 30 % de la production mondiale de pétrole (soit 25 millions de barils par jour), ce qui correspond à 20 % des réserves mondiales. Par ailleurs, il représente 27 % de la production de gaz, soit 30 % des réserves mondiales.

Les trois plus gros producteurs sont l'Arabie saoudite, les États-Unis et la Russie.

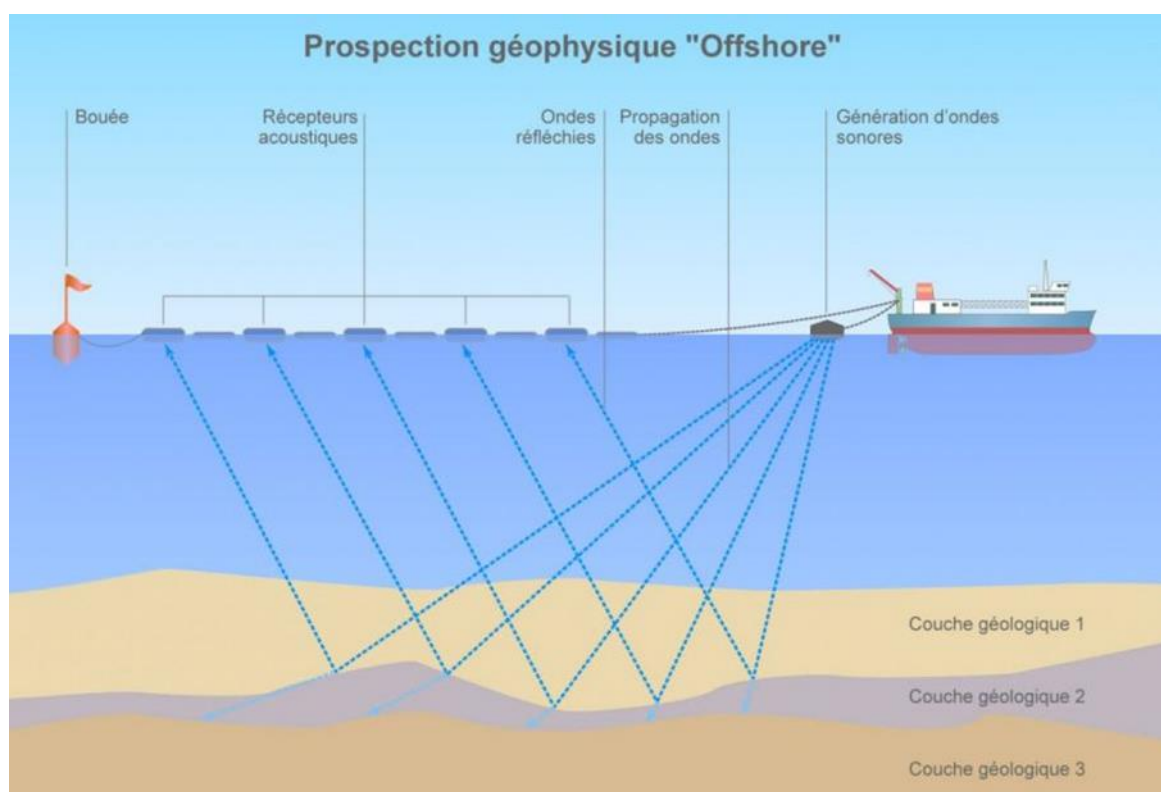


Figure I.10. Schéma de prospection en mer « offshore ».<sup>22</sup>

#### 4. Forages d'exploration (vérification des hypothèses)

##### 4.1. Définition et principe du forage

Le forage<sup>23</sup> pétrolier (**Figure I.11**) permet d'atteindre les roches poreuses et perméables du sous-sol, susceptibles de contenir des hydrocarbures liquides ou gazeux. Son implantation est décidée à la suite des études géologiques et géophysiques effectuées sur un bassin sédimentaire. Le coût du forage d'exploration est de 500 000 euros à terre. Cette étape, qui dure de 2 à 6 mois, est la plus lourde dans le budget d'exploration, représentant en moyenne 60 %.

<sup>22</sup> Source : <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/prospection-exploration-gaziere-et-petroliere>

<sup>23</sup> Le colonel Drake forsa son premier puits de pétrole en Aout 1859, à 23 mètres de profondeur (USA).

Après la prospection, le forage est la seule méthode pour confirmer la présence d'hydrocarbures et pour définir :

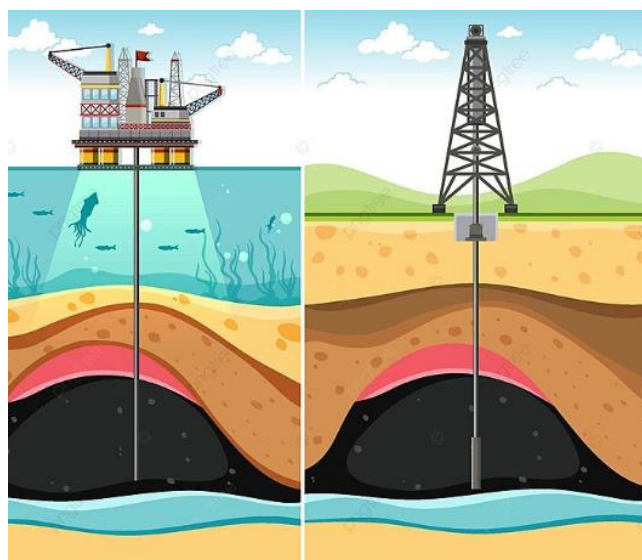
1. La qualité de l'effluent du puits (huile ? gaz ? huile saturée de gaz ? eau ?) ;
2. La perméabilité du réservoir ;
3. La production potentielle et la quantité d'huile ou de gaz.

Le forage constitue l'étape essentielle pour l'installation de puits permettant la récupération des hydrocarbures (pétrole et gaz) contenus dans la roche-réservoir (gisement).

La profondeur des forages varie considérablement selon les sites, de quelques centaines de mètres à plusieurs milliers de mètres.

Les premiers forages réalisés ont été effectués à partir de la terre ferme, sous forme de puits verticaux. Depuis lors, les techniques ont considérablement évolué :

1. **Forages marins** à plus ou moins grande profondeur (*offshore*) ;
2. **Forages dirigés** permettant d'atteindre des réservoirs situés sous des zones peu accessibles ;
3. **Forages complexes** permettant d'améliorer le taux de récupération des hydrocarbures.



**Figure I.11.** Forage pétrolier : extraire des gisements de pétrole du substratum rocheux terrestre et marin vecteur.<sup>24</sup>

#### 4.2. Architecture d'un forage

Dans la plupart des cas, un forage est composé de trois parties (**Figure I.12**) :

- 1- Une *colonne de surface*, de quelques centaines de mètres, destinée à retenir les terrains de surface et à protéger la nappe phréatique ;

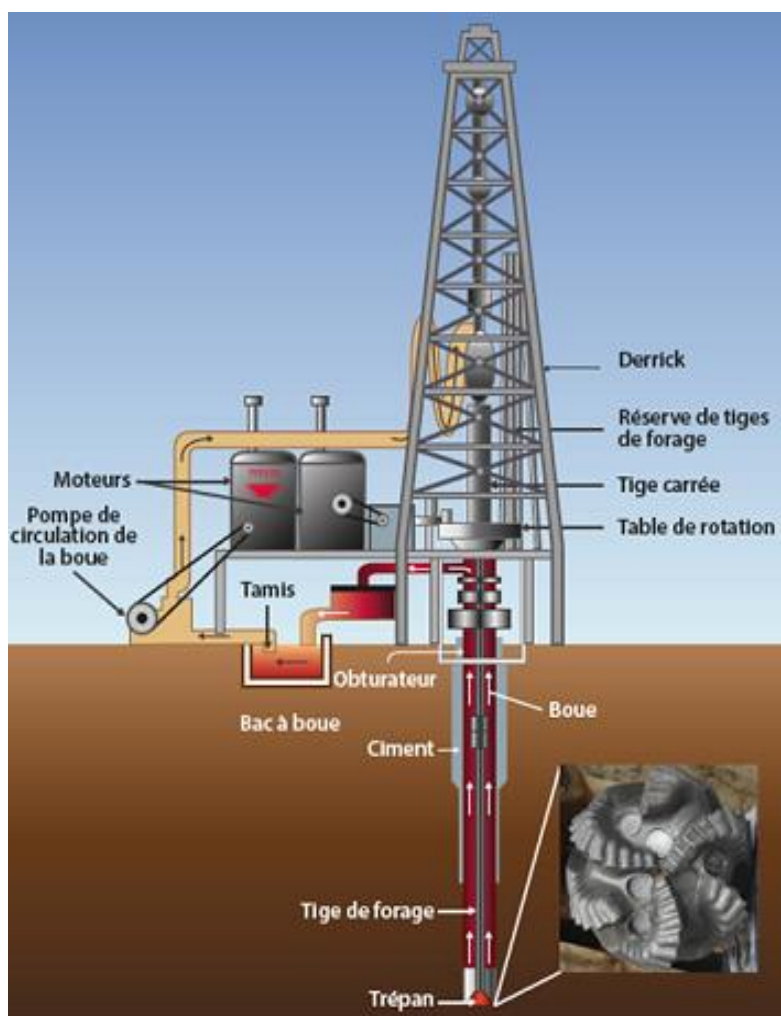
<sup>24</sup> Source: Oil and Gas Upstream Fundamentals, course. convacademy. 2020.

- 2- La *colonne intermédiaire*, qui peut atteindre plusieurs milliers de mètres ;
- 3- Finalement, la *colonne de production*, située dans la partie pétrolifère ou gazière, à l'intérieur de laquelle sera installé le tube de collecte des hydrocarbures.

Un **appareil de forage** est constitué d'un **mât** ou d'une **tour de forage (derrick)**, qui sert de support pour positionner des tiges de forage. À l'extrémité de la première tige se trouve l'outil de perçage, généralement un **trépan (Figure I.12)**, qui découpe la roche au fond du puits.

Au fur et à mesure que l'on s'enfonce dans le sous-sol, on ajoute de nouvelles tiges de forage en les vissant aux précédentes, constituant un train de tiges creuses stocké dans le derrick.

La technique du forage rotatif consiste à utiliser un trépan disposé à l'extrémité des tiges de forage, que l'on fait tourner. Le forage se réalise sous l'action combinée du poids sur le trépan (plusieurs dizaines de tonnes) et de sa rotation (environ 200 tr/min).



**Figure I.12.** Schéma de principe d'un appareil de forage.<sup>25</sup>

<sup>25</sup> Source : <https://www.crystal-sleeve.com/puits-de-forage-et-forage-p294160.html>

#### 4.2.1. Définition d'un trépan

Un trépan (terme issu du grec *trupao* : « je perce ») est un outil de forage rotatif, aujourd'hui spécialement utilisé dans l'industrie pétrolière et dans les travaux publics.

Les trépan (Figure I.13) sont constitués de trois molettes dentées en acier très dur.

- La durée de vie des trépan dépend des terrains traversés, mais elle est en général d'une centaine d'heures.
- Le changement d'un trépan nécessite la remontée de l'ensemble des tiges de forage.
- La vitesse de progression d'un forage est également fonction des terrains traversés et est de l'ordre de quelques mètres par heure.



Figure I.13. Trépan.<sup>26</sup>

#### 4.2.2. Fluide de forage

Un élément essentiel : le fluide de forage (et son circuit hydraulique).

Pendant que l'on creuse le trou, on injecte en permanence, à l'intérieur des tiges, du fluide de forage appelé boue (Figure I.14).

Indispensable, ce mélange d'eau et d'argile appelé bentonite (et parfois à base d'hydrocarbures, par exemple du gasoil, en fonction des contraintes environnementales et des autorisations locales) sert à refroidir le trépan, contenir les bords du puits et remonter les déblais.

Le débit du fluide de forage est assuré depuis la surface au moyen de pompes à boue, avec un débit de 50 à 150 m<sup>3</sup>/h, nécessaire pour garantir une vitesse suffisante de remontée des boues dans l'espace annulaire.

<sup>26</sup> Source : <http://www.connaissancedesenergies.org>

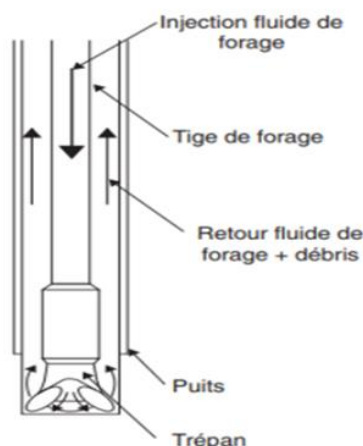


Figure I.14. Injection de boue de forage.<sup>27</sup>

### 5. Analyse pétrographique<sup>28</sup>

Un géologue suit de très près cette opération et procède à l'examen des débris de forage, appelés cuttings en anglais (**Figure I.15**). L'analyse physicochimique de ces débris permet de caractériser les roches traversées et, en fin de forage, de confirmer la présence de pétrole.

Les *débris* (déblais) correspondent aux fragments de roche arrachés par l'outil de forage. Ils sont remontés à la surface par le fluide de forage, généralement une boue spéciale, qui assure leur évacuation tout au long de l'opération.



Figure I.15. Analyse pétrographique des déblais de forage (Eng. Cuttings).<sup>29</sup>

### 6. Traitement sur champ

Les hydrocarbures issus des puits de production ne peuvent pas être vendus ou exportés tels quels aux différents utilisateurs. Ils doivent subir un certain nombre de traitements sur le champ de production afin de répondre aux spécifications de qualité souhaitées par les clients.

<sup>27</sup> Source : Jean-Pierre Wauquier, "Pétrole : Exploration, production, transformation" Tome 2 : "Production et traitement du pétrole" Éditions Technip, 1995. ISBN : 9782710806686.

<sup>28</sup> La pétrographie du grec : description des pierres.

<sup>29</sup> Source : Jean-Pierre Caumon, "Géologie pétrolière. Éditions Technip, 1996. ISBN : 9782710807188.

## 6.1. Traitement du pétrole brut

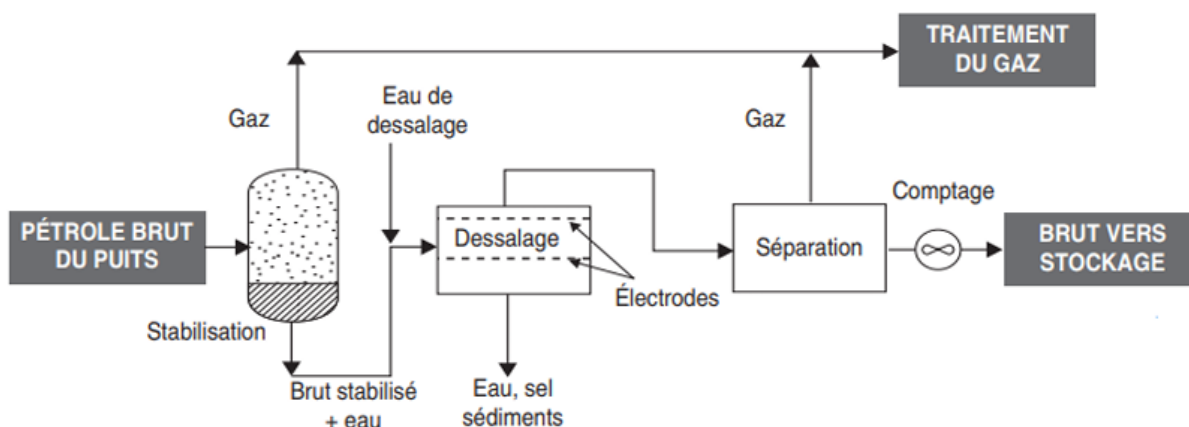
Un gisement de pétrole brut produit un mélange d'hydrocarbures lourds et légers, sous forme liquide et gazeuse, auquel peuvent s'ajouter des constituants gazeux non hydrocarbonés (tels que l'azote, le gaz carbonique, l'hydrogène sulfuré, etc.), de l'eau plus ou moins salée, ainsi que, éventuellement, des solides.

Les traitements consistent :

- à stabiliser le brut en le séparant de la phase gazeuse ;
- à éliminer l'eau, le sel et les sédiments au moyen d'une installation de dessalage.

Les traitements effectués peuvent être résumés de la façon suivante (**Figure I.16**) :

1. Le brut est envoyé dans des séparateurs successifs, de façon à provoquer le dégazage des hydrocarbures légers ainsi que la décantation de l'eau. Le brut ainsi obtenu est dit stabilisé.
2. L'effluent gazeux est traité pour une utilisation sur le champ producteur (puits injecteur de gaz) ou pour expédition.
3. L'effluent d'eau est traité pour une utilisation sur le champ producteur (puits injecteur d'eau).
4. Le brut stabilisé est ensuite mélangé à de l'eau douce et traité dans un dessaleur. Dans le dessaleur, l'eau dissout le sel et entraîne les sédiments par gravité. La séparation gravitaire est en général facilitée par la création d'un champ électrique élevé au moyen d'électrodes.
5. Le brut dessalé subit ensuite un dégazage final dans des colonnes, avant expédition vers le stockage. Il est ensuite exporté par navire ou pipeline.



**Figure I.16.** Traitement du pétrole brut sur champ de production (dessalage).<sup>30</sup>

<sup>30</sup> Source : Jean-Pierre Wauquier, "Pétrole : Exploration, production, transformation" Tome 2 : "Production et traitement du pétrole" Éditions Technip, Paris, 1995. ISBN : 9782710806686

## 6.2. Traitement du gaz

Le gaz naturel, à la sortie du puits, peut être accompagné de vapeur d'eau ou d'eau liquide, de constituants non hydrocarbonés tels que l'azote, le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et l'hydrogène sulfuré (H<sub>2</sub>S), ainsi que de particules solides. Par ailleurs, certains hydrocarbures plus lourds, initialement à l'état gazeux dans la roche réservoir, peuvent se condenser en liquides appelés condensats, qu'il faut éliminer.

Les traitements du gaz consistent donc principalement à (**Figure I.17**) :

- *Éliminer les composés acides et soufrés (adouccissement)*

Ce traitement s'effectue par absorption des gaz acides (H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub>, mercaptans) dans une solution d'amine. Cette solution est ensuite régénérée et recyclée. L'objectif est d'éliminer ces constituants corrosifs et dangereux, notamment le H<sub>2</sub>S.

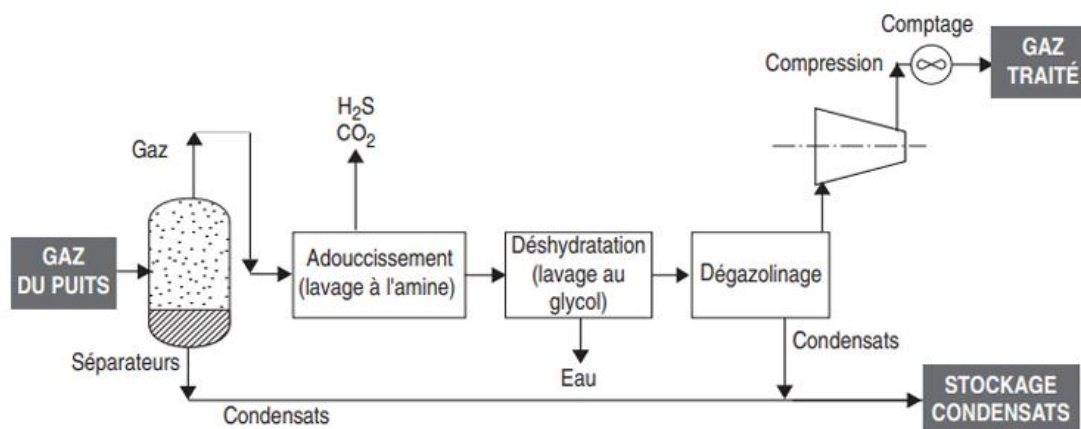
- *Déshydrater le gaz*

L'eau est retirée par absorption dans un liquide glycol (souvent du triéthylène glycol, TEG), qui est lui aussi régénéré et recyclé. La suppression de l'eau évite la formation d'hydrates, des cristaux d'eau et d'hydrocarbures légers qui peuvent boucher les canalisations et interrompre la production.

- *Éliminer les condensats (dégazolinage)*

Ce procédé consiste à refroidir le gaz entre environ +5 °C et -15 °C pour condenser les hydrocarbures lourds sous forme liquide, puis à séparer ces liquides du gaz. Cette étape permet de valoriser les hydrocarbures liquides et d'assurer la qualité du gaz commercialisé.

☞ Ces traitements sont essentiels pour rendre le gaz naturel sûr, conforme aux normes et adapté à son transport et à son utilisation industrielle ou domestique.



**Figure I.17.** Traitement du gaz sur champ de production.<sup>31</sup>

<sup>31</sup> Source : Jean-Pierre Caumon, "Géologie pétrolière. Éditions Technip, 1996. ISBN : 9782710807188.

## 7. Transport

Après extraction, le pétrole est transporté par des *oléoducs (pipelines)* vers les unités de traitement ou les raffineries. Il s'agit de canalisations spécialement conçues pour cette opération. Ces pipelines sont tous sous surveillance afin de détecter au plus vite les fuites qui pourraient survenir.

Les produits pétroliers sont également transportés des centres de stockage aux zones de distribution par des *camions citernes* et des *camions spécialisés*. Ceux-ci sont larges, longs et disposent d'unités de stockage spécifiques pour se prémunir contre les accidents.

Pour le transport maritime, une partie du brut est exportée vers les pays acheteurs à l'aide de *tankers (navires transporteurs)* (**Figure I.18**). Le principal atout du transport maritime est sa souplesse : à chaque instant, on peut modifier la destination d'un navire.

L'oléoduc, ou pipeline, représente un lourd investissement, mais il offre un faible coût d'utilisation



**Figure I.18.** Oléoduc, wagon-citerne, camion-citerne et tanker. <sup>32\_33\_34</sup>

### II.7. Bassins producteurs du pétrole et du gaz naturel en Algérie

L'Algérie possède plusieurs grands bassins producteurs, à savoir :

*1- Le grand erg occidental (bassin d'Ahnet), qui produit surtout du gaz.*

Hassi R'Mel est le plus grand gisement de gaz d'Afrique ; il est le cœur de la production de gaz de la Sonatrach (compagnie nationale). En plus de sa propre production, il centralise le gaz des autres régions et constitue le point de départ des gazoducs d'exportation vers l'Espagne (via le Maroc) et l'Italie (via la Tunisie), comme montré sur la **Figure I.19**.

L'Algérie a repris, en septembre 2022, la première place des fournisseurs de gaz en Espagne.

Depuis 2023, les livraisons de gaz algérien à l'Espagne se font désormais exclusivement via le gazoduc sous-marin MEDGAZ, lancé en 2011 (voir **Figure I.20**).

<sup>32</sup> Source : Le « Samco Redwood » a perdu son pavillon français. (Photo : Samco).

<sup>33</sup> Source : <http://tpe.maree.noire.free.fr/petrole/transport.htm>

<sup>34</sup> Source : <https://www.econonord.com/2018/03/solutions-transport-petrole-voie-terrestre/>

☞ **Remarque :** MEDGAZ est un gazoduc qui relie les installations algériennes de Béni Saf au port d'Almería, en Espagne, en passant sous la mer Méditerranée.



**Figure I.19.** HassiR'Mel le point de départ des gazoducs d'exportations vers l'Espagne (via le Maroc) et l'Italie (via la Tunisie).<sup>35</sup>

- *Gazoduc qui relie l'Espagne :* construit sur une longueur de 210 km, il a pour but d'améliorer la sécurité d'approvisionnement. Il constitue la voie la plus économique pour l'approvisionnement en gaz naturel du sud de l'Europe, afin de répondre à la demande croissante de gaz naturel.



**Figure I.20.** Gazoduc sous-marin MEDGAZ entre l'Algérie et l'Espagne.<sup>36</sup>

- 2- *Le grand Erg oriental*, ou bassin de Berkine, est plutôt *pétrolier*. On y trouve le gisement de Hassi Messaoud, le plus grand gisement de pétrole d'Afrique, avec un pétrole de très bonne qualité.
- 3- *Le bassin d'Illizi*, un peu plus au sud, est principalement *gazier*.

<sup>35</sup> Source : France 24 / Cartographie des principaux gazoducs reliant l'Algérie à l'Europe.

<sup>36</sup> Source : Sonatrach & Cedigaz, "Les réseaux de transport du gaz naturel en Algérie", Rapport Cedigaz, 2019.

4- Le bassin d'In Salah, dont les importantes réserves de gaz commencent à être développées.

La Figure I.21 montre la carte des différents bassins producteurs de pétrole et de gaz en Afrique du Nord.

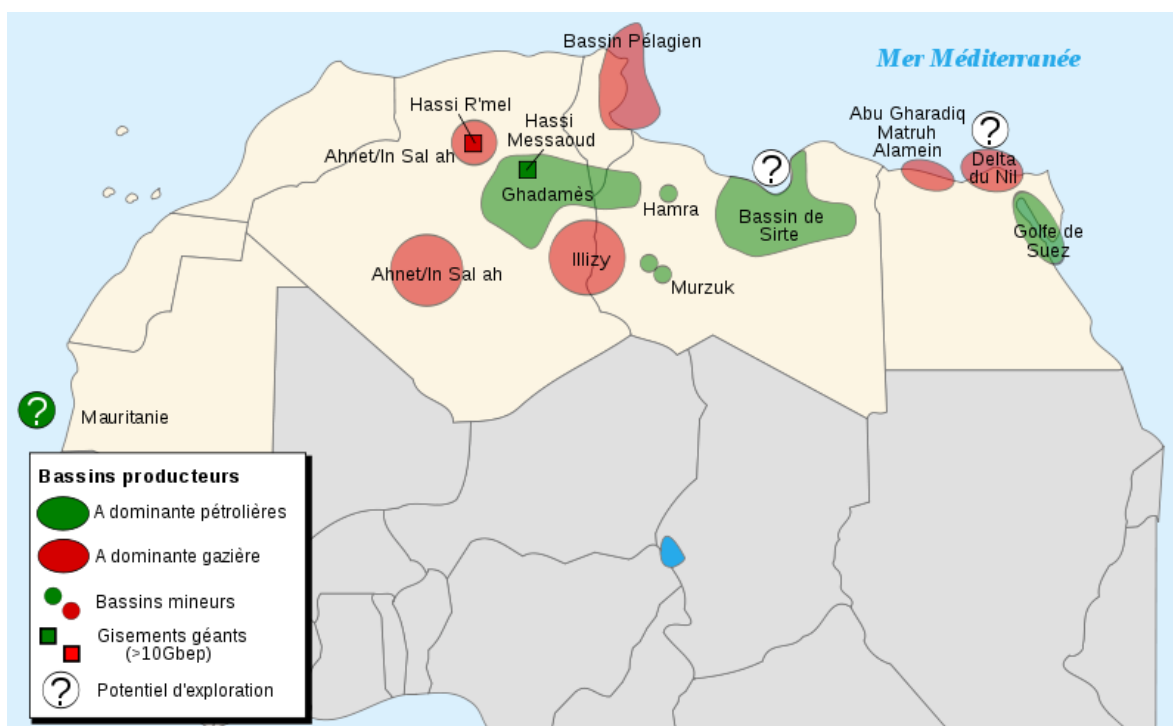


Figure I.21. Carte des bassins producteurs en Afrique du Nord.<sup>37</sup>

<sup>37</sup> Source : Petroleum regions - North Africa map-fr.svg

## CHAPITRE II.

### Schémas de Raffinage du Pétrole

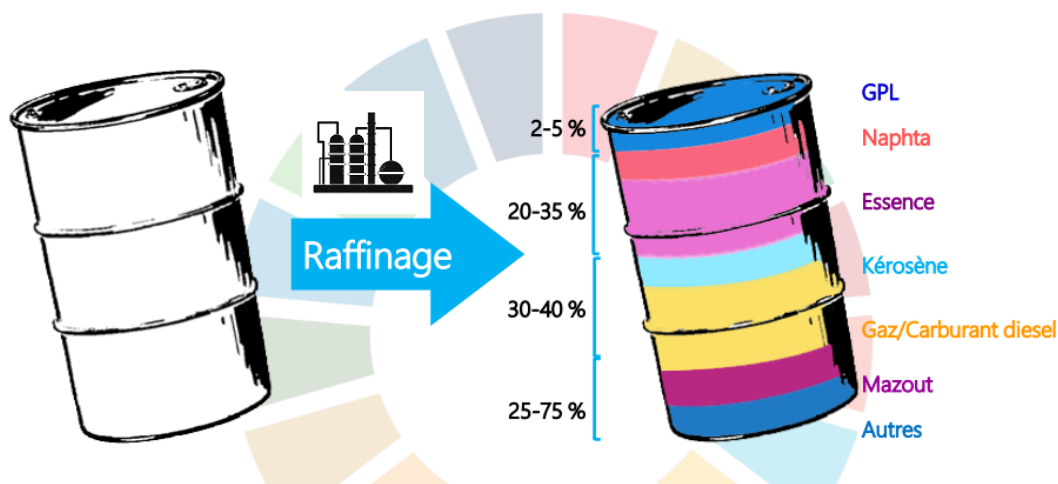
#### Introduction

Le pétrole est la première source d'énergie dans le monde depuis les années 1950, mais aussi la matière première de l'industrie pétrochimique.

Il est à l'origine d'un nombre incalculable de produits dérivés, des matières plastiques aux peintures, en passant par les cosmétiques. Cependant, cette ressource n'est jamais utilisée à l'état brut : elle doit subir un ensemble d'opérations réunies sous le terme de « raffinage du pétrole ».

Le raffinage du pétrole (**Figure II.1**) désigne l'ensemble des traitements et transformations permettant d'obtenir, à partir du pétrole brut, un maximum de produits à haute valeur commerciale. En effet, le pétrole brut est un mélange, en quantités variables, de plusieurs hydrocarbures et de molécules appelées résines et asphaltes.

Il existe autant de bruts différents que de gisements, avec des différences de couleur, de viscosité, de teneur en soufre et en minéraux, etc.



**Figure II.1.** Les différentes coupes pétrolières issues du raffinage. <sup>38</sup>

#### I. Raffinage en Algérie

En Algérie, l'industrie de raffinage est née avec la découverte et la production du pétrole brut de Hassi Messaoud.

<sup>38</sup> Source: 7th APEC Workshop on Energy Statistics 11-13 June 2019, Tokyo, Japan.

Le gisement d'Hassi Messaoud, situé dans le bassin de Berkine, est le plus grand gisement de pétrole en Algérie et de tout le continent africain. Il fut découvert la même année que le gisement de gaz d'Hassi R'Mel, son équivalent pour le gaz (principal gisement de gaz d'Afrique). Tous deux contribuèrent à la détermination de la France pour le maintien de sa présence en Algérie.

La première unité fut construite sur les lieux mêmes de la découverte, orientée vers la satisfaction des besoins excessifs des sociétés opérantes dans le cadre de la recherche et de l'exploitation du brut.

Aussitôt l'indépendance acquise, l'Algérie s'est attachée à l'idée d'accéder au développement économique en favorisant la mise en place d'une industrie pétrolière par la transformation systématique de ses hydrocarbures. C'est ainsi que furent réalisées diverses unités industrielles, ainsi que des extensions de celles déjà en place, en vue d'accroître les capacités de première transformation.

### **I.1. Raffineries en Algérie <sup>39</sup>**

Le **Tableau II.1** et la **Figure II.2** montrent les cinq raffineries les plus importantes en Algérie :

- Au nord : Alger, Arzew et Skikda.
- Au sud : Hassi Messaoud et Adrar.

**Tableau II.1** - Capacité de traitement du pétrole brut et condensat des raffineries (millions de tonnes/an).

Raffinerie de Skikda (RA1.K)	16,5
Raffinerie d'Arzew (RA1.Z)	3,75
Raffinerie d'Alger (RA1.G)	3,64
Raffinerie de Hassi-Messaoud (RHM)	1,07
Raffinerie d'Adrar (RAD)	0,6

### **I.2. Projets de développement du raffinage en Algérie**

Afin de satisfaire la demande du marché national et l'exportation des excédents des produits raffinés, le secteur des hydrocarbures a inscrit dans son plan de développement la réalisation de

<sup>39</sup> Source : <https://www.energy.gov.dz/?rubrique=produits-petroliers>.

deux (2) nouvelles raffineries, ainsi que deux (2) unités d'hydrocraquage du fuel-oil et de traitement du naphta excédentaire.

- Ce plan se résume comme suit :
  - Nouvelle raffinerie à Hassi-Messaoud, d'une capacité de traitement de pétrole brut de 5 millions de tonnes/an.
  - Nouvelle raffinerie à Tiaret, d'une capacité de traitement de pétrole brut de 5 millions de tonnes/an.
  - Projet d'hydrocraquage de fuel-oil à Skikda, d'une capacité de traitement de 4,6 millions de tonnes/an.
  - Projet de traitement de naphta excédentaire à Skikda, d'une capacité de traitement de 4 millions de tonnes/an.

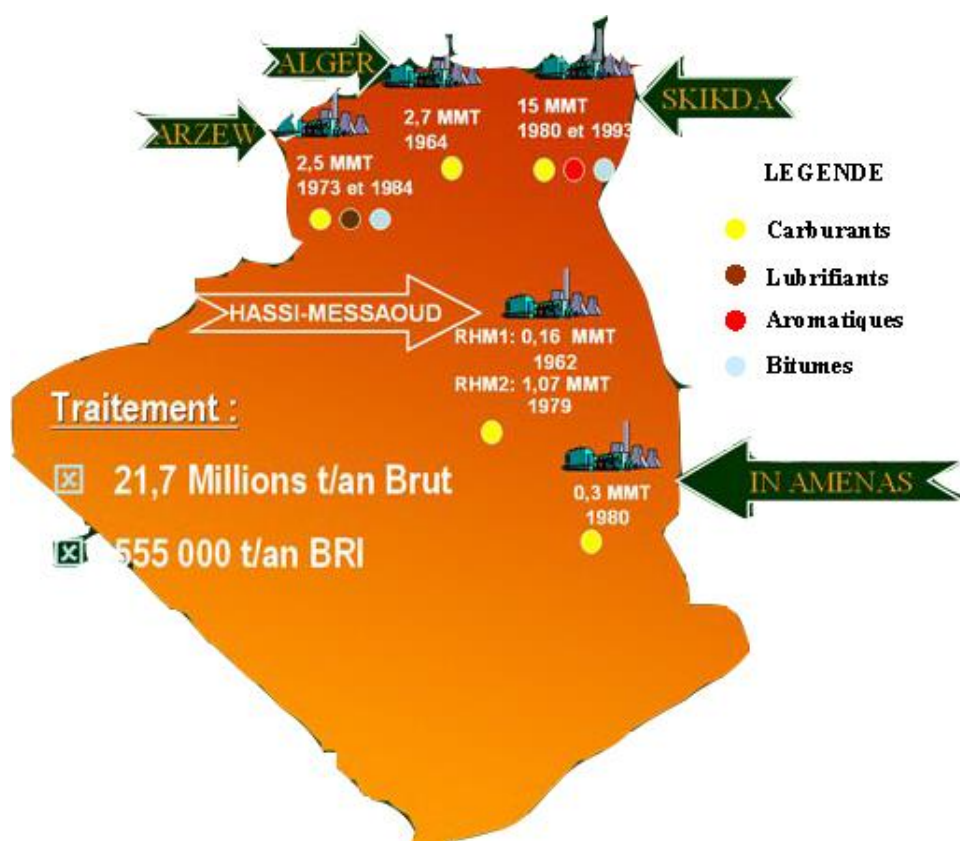


Figure II.2. Naftec : carte d'identité. <sup>40</sup>

<sup>40</sup> Source : <http://www.naftec.dz/>

### Quelle est l'origine de l'unité **baril** de pétrole ?

L'origine de cette unité remonte aux années 1860-1870. À cette époque, des barils fabriqués pour d'autres industries et commerces (whisky, huile de baleine, sel, poissons, etc.) étaient employés pour le stockage et le transport du pétrole, par train ou par bateau.



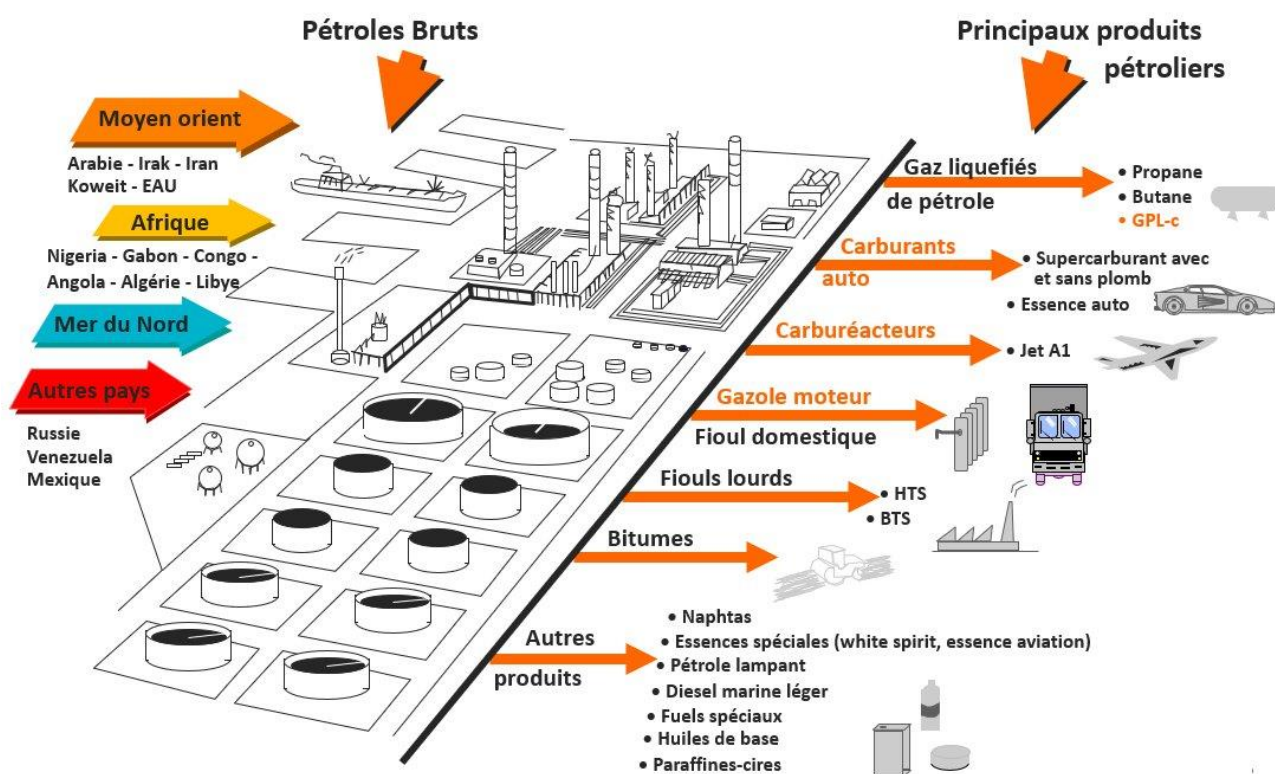
**Un baril = 159 litres**

### II. Différents produits dérivés du pétrole <sup>41</sup>

Le pétrole brut est constitué d'un mélange de plusieurs molécules et hydrocarbures (appelés résines et asphaltènes) présents en quantités variables. Ces composants doivent être fractionnés et transformés pour produire les différents produits dérivés du pétrole utilisés dans l'industrie : les carburants, les combustibles, les matières premières employées dans la pétrochimie, le bitume, les huiles lubrifiantes, etc. C'est le raffinage, c'est-à-dire la « purification » du pétrole brut, qui permet de le transformer en produit présentant une composition à peu près constante.

Quels sont les principaux produits dérivés du pétrole ?

La **Figure II.3** illustre les principaux produits pétroliers obtenus après raffinage.



**Figure II.3.** Les principaux produits pétroliers.<sup>42</sup>

<sup>41</sup>Raffinage du pétrole (Le). Tome 1. Pétrole brut. Produits pétroliers. Schémas de fabrication. Chapitre I : Composition des pétroles bruts et des produits pétroliers. Auteur : Jean-Pierre Wauquier.

<sup>42</sup> Source : IFP School – Les produits du raffinage.

Après extraction et raffinage, le pétrole brut donne naissance à une large gamme de produits, parmi lesquels :

### 1. Gaz de pétrole liquéfiés (GPL)

Les gaz de pétrole liquéfiés (GPL) sont des mélanges d'hydrocarbures légers, principalement du propane ( $C_3H_8$ ) et du butane ( $C_4H_{10}$ ), issus à 40 % du raffinage du pétrole et à 60 % du traitement du gaz naturel. Ces hydrocarbures saturés se caractérisent par leur capacité à se liquéfier à température ambiante sous une pression modérée (entre 1,5 et 7 bars), ce qui facilite leur stockage et transport.

#### - *Liquéfaction des GPL :*

- À pression atmosphérique (1 bar), le propane devient liquide en dessous de  $-42^{\circ}C$ , tandis que le butane se liquéfie dès que la température descend en dessous de  $0^{\circ}C$ .
- Le mélange GPL, composé de propane et butane, a un point de liquéfaction intermédiaire, autour de  $-25^{\circ}C$  à pression atmosphérique.
- Par comparaison, le méthane, composant principal du gaz naturel, nécessite des conditions extrêmes pour se liquéfier (par exemple, 45 atm à  $-82^{\circ}C$  ou 1 atm à  $-161^{\circ}C$ ).

Ces propriétés permettent de manipuler le GPL sous forme liquide à température ambiante en appliquant une pression modérée, contrairement aux gaz comme le méthane qui nécessitent des pressions très élevées ou des températures très basses pour être liquéfiés.

#### - *Utilisations des GPL :*

Les GPL sont utilisés dans diverses applications, notamment :

- **Énergie domestique** : Chauffage et cuisson dans les zones non desservies par le gaz naturel, avec des appareils adaptés au GPL.
- **Applications itinérantes** : Bouteilles pour restauration, briquets, lampes, etc.
- **Climatisation** : Utilisation de la détente des GPL pour absorber la chaleur et produire du froid.
- **Transports** : Carburant pour véhicules, bateaux de plaisance, etc., grâce à leur caractère moins polluant comparé à d'autres carburants fossiles.

#### - *Différence entre GPL et GNL*

- Le GPL est un mélange liquide de propane et butane stocké sous pression modérée à température ambiante.
- Le GNL (gaz naturel liquéfié) est principalement du méthane liquéfié à très basse température ou haute pression, nécessitant des conditions plus sévères pour sa liquéfaction.

Ainsi, les GPL constituent une classe de carburant intéressante, notamment pour leur faible pollution et leur facilité de stockage et de transport comparée aux autres gaz.

## **2. Naphta**

Très volatil et inflammable, le naphta trouve son utilisation dans de nombreuses industries humaines, comme solvant, carburant et à des fins industrielles.

### *- Fins industrielles*

Les usines utilisent le naphta comme matière première la plus courante pour la création de plastiques tels que le polypropylène et le polyéthylène. Différents produits chimiques à base de naphta servent également de matières premières pour la fabrication de produits pétrochimiques, notamment le butane et l'essence.

## **3. Essences auto**

L'essence auto est une huile légère d'hydrocarbures utilisée comme carburant dans les moteurs à allumage commandé (moteurs à essence). Sa température de distillation se situe entre 35 et 200 °C. Cette huile est traitée afin d'atteindre un indice d'octane élevé, généralement compris entre 80 et 100 IOR. Ce traitement peut s'effectuer par reformage, craquage catalytique ou mélange avec une fraction aromatique.

☞ **Remarque** : L'indice d'octane mesure la résistance d'un carburant à s'enflammer spontanément dans un moteur.

Il existe donc trois types d'essences qui sont :

### *3.1. Essence ordinaire*

Elle est composée essentiellement d'un mélange d'hydrocarbures de structures variées (paraffiniques, oléfiniques, naphthéniques, aromatiques - environ 4 % de benzène) distillant à moins de 205 °C, auquel est ajouté, entre autres, un agent antidétonant à base de plomb. L'efficacité de la combustion est caractérisée par un indice d'octane situé entre 89 et 92.

### *3.2. Essence super*

Elle est de même nature que l'essence ordinaire, mais obtenue par un procédé de raffinage spécial afin d'améliorer l'indice d'octane, qui est de 97 à 99. Sa composition diffère de celle de l'essence ordinaire par une teneur en benzène plus élevée (4 à 6 %), due à la diminution du taux de plomb, ainsi qu'une teneur en soufre plus élevée (0,5 %).

### *3.3. Super sans plomb*

Ce type d'essence a totalement supplanté le super avec plomb. Les additifs utilisés sont le MTBE (méthyltertiobutyléther), additif le plus employé, et le benzène, ajouté en vue d'améliorer l'indice d'octane.

☞ **Remarque** : Le plomb est ajouté à l'essence depuis les années 1920 pour deux raisons : il sert à lubrifier les soupapes des moteurs et, surtout, joue un rôle d'antidétonant en évitant que le mélange air-essence n'explose trop tôt. Cette caractéristique est symbolisée par « l'indice d'octane ».

#### **4. Kérosène**

Le kérosène est essentiellement destiné à l'alimentation des avions à réaction. Il est donc composé d'un mélange d'hydrocarbures distillant entre 140 et 300 °C, dont les principaux constituants sont des hydrocarbures de C<sub>9</sub> à C<sub>16</sub> (paraffiniques, iso-paraffiniques, naphéniques et aromatiques).

#### **5. Gas-oil**

Le gazole, ou gas-oil, est une huile lourde composée d'un mélange d'hydrocarbures (paraffiniques, naphéniques, aromatiques et oléfiniques). Il est utilisé comme carburant dans les moteurs diesel, dont la température de distillation se situe entre 200 et 380 °C, avec une densité supérieure à 0,82. Sa composition chimique s'étend du C<sub>14</sub> au C<sub>20</sub>.

☞ **Remarque** : Le nombre de cétane est un indice permettant d'évaluer précisément l'aptitude d'un gazole à s'auto-enflammer. Plus ce nombre est élevé, plus le délai d'auto-inflammation est court.

#### **6. Fioul domestique**

Le fioul domestique est un combustible généralement utilisé dans les chaudières. Il est constitué d'un mélange d'hydrocarbures de C<sub>9</sub> à C<sub>20</sub>, avec un point d'ébullition compris entre 163 et 357 °C. Le fioul domestique fait partie des fiouls légers et a une composition très proche de celle du gazole.

#### **7. Fioul lourd**

Le fioul lourd est un produit issu de diverses fractions de raffinerie, généralement les plus lourdes. Sa composition est complexe et varie selon la provenance du pétrole brut. Le fioul lourd est constitué de produits d'origine paraffinique, naphénique et aromatique. Il peut contenir des dérivés de soufre et des acides organiques. Les fiouls lourds sont classés selon leur teneur en soufre.

#### **8. Lubrifiants**

Les lubrifiants réduisent les frottements et l'usure des pièces mobiles des moteurs et des machines. Ils sont constitués d'un mélange d'hydrocarbures liquides et visqueux, riches en paraffines, dont les températures de distillation se situent entre 380 et 500 °C, et qui sont obtenus par distillation sous vide des résidus de la distillation atmosphérique du pétrole.

## 9. Bitume

Issu de la distillation du pétrole, le bitume se définit comme un mélange d'hydrocarbures. Ce matériau, de couleur noire, existe également à l'état pur via des gisements naturels, mais en très faibles quantités. Il est utilisé comme liant pour la fabrication de nombreux revêtements, tels que les routes, les parkings, les trottoirs, ou encore des matériaux et produits d'étanchéité.

### III. Schémas des procédés de raffinage du pétrole

L'objet du raffinage du pétrole brut est de convertir la matière première (pétrole brut) en produits utiles et commercialisables. Dans les raffineries, le pétrole brut est transformé en différents produits, dont :

- des carburants pour les voitures, les camions, les avions, les navires et les autres formes de transport ;
- des fuels de combustion pour la génération de chaleur et d'énergie, destinés à l'industrie et à l'habitat ;
- des matières premières pour les industries pétrochimiques et chimiques ;
- des produits spécialisés, comme les lubrifiants, les paraffines/cires et le bitume ;
- de l'énergie, en tant que sous-produit, sous la forme de chaleur (vapeur d'eau) et d'électricité.

#### III.1. Prétraitement du pétrole brut

Le pétrole brut contient souvent de l'eau, des matières inorganiques, des solides en suspension et des traces de métaux stables dans l'eau. À son arrivée dans la raffinerie, le pétrole brut est stocké dans de grands réservoirs, appelés cuves de stockage (**Figure II.4**), situées au-dessus du sol, d'une capacité comprise entre plusieurs milliers et plusieurs millions de litres.

Les pétroles bruts sont stockés et séparés selon leur teneur en soufre.



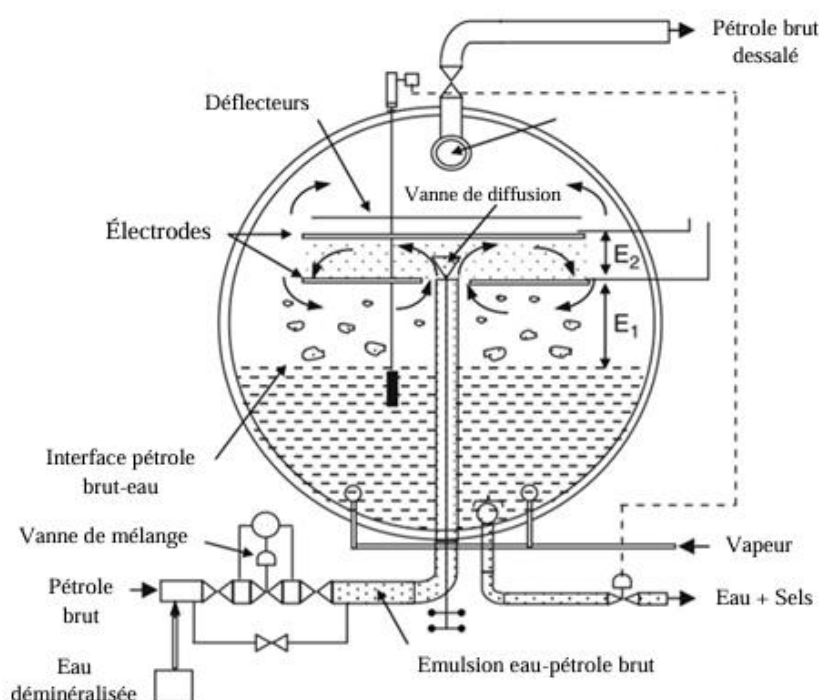
**Figure II.4.** Cuves de stockage (site de stockage de Cushing, Oklahoma (États-Unis), l'un des plus grands hubs pétroliers mondiaux).

La première étape du raffinage consiste à éliminer ces contaminants par dessalage afin de réduire :

1. la corrosion ;
2. l'encrassement des installations ;
3. l'empoisonnement des catalyseurs dans les unités de production.

Même s'il a été préalablement dessalé sur le champ de production (**Figure I.17**), le pétrole brut a recueilli, au cours de son transport maritime, des chlorures de sodium, de magnésium et de calcium - d'une dizaine de grammes à plusieurs kilogrammes par tonne, suivant son origine - qu'on dissout en y injectant de 7 à 8 % d'eau douce, formant ainsi une émulsion chaude. Cette émulsion s'écoule dans un récipient cylindrique horizontal où elle est soumise à l'action d'un champ électrostatique de 20 000 à 35 000 volts, qui favorise l'agglomération des gouttes d'eau chargées de sels et leur séparation par décantation (**Figure II.5**).

Les eaux usées et les contaminants qu'elles contiennent sont récupérés à la partie inférieure du bac de décantation et acheminés vers l'unité d'épuration des eaux usées. Le pétrole brut dessalé est récupéré de la partie supérieure du bac de décantation et envoyé à une tour de distillation atmosphérique (tour de fractionnement).



**Figure II.5.** Schéma simplifié d'un dessaleur électrostatique.<sup>43</sup>

<sup>43</sup> Source : Vérification de la performance du dessalage électrostatique de l'unité 'Topping' - Raffinerie de Skikda »

### III.2. Procédés de raffinage du pétrole

Le pétrole brut n'est pas utilisé tel quel, mais transformé en différents produits finis : carburants, combustibles, matières premières pour la pétrochimie et autres produits spécifiques (bitume, huiles lubrifiantes). C'est l'objectif du raffinage : mettre à la disposition du consommateur des produits de qualité, dans le respect de normes précises – notamment environnementales – et aux quantités requises par le marché. Cette étape regroupe différentes opérations : séparation, conversion, amélioration et mélange, chacune apportant à l'or noir une qualité supplémentaire (Figure II.6).

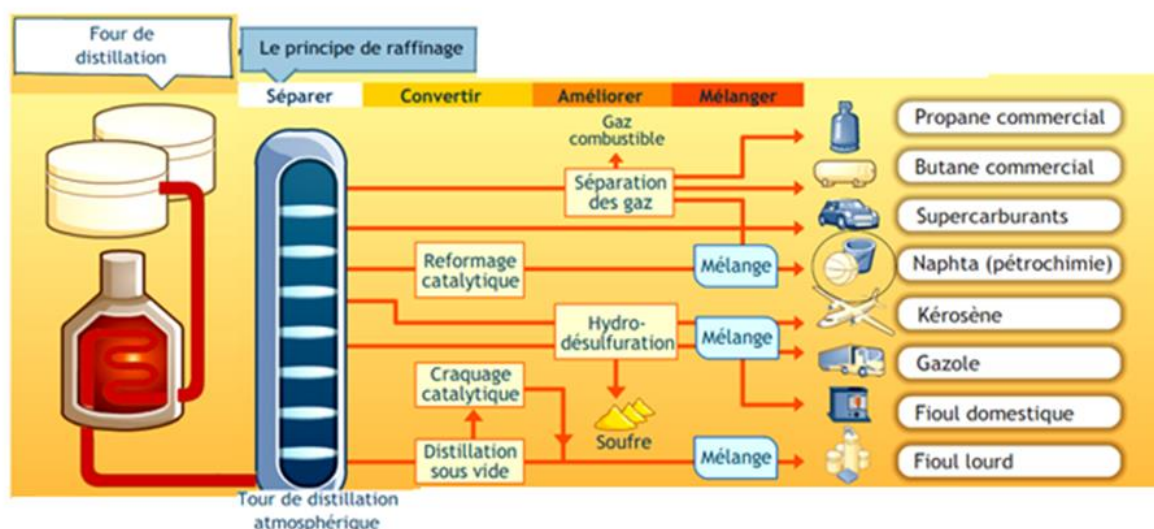


Figure II.6. Les différentes opérations de raffinage du pétrole.<sup>44</sup>

#### III.2.1. Procédés de SEPARATION

La distillation, première étape du raffinage du pétrole, consiste à séparer les différentes molécules en fonction de leur poids. Le pétrole est chauffé à haute température dans une colonne de distillation afin de former différentes couches :

- En bas de la colonne de distillation, se trouvent les molécules les plus lourdes, comme le bitume.
- Au milieu, se concentrent les coupes dites moyennes (diesel, fioul domestique, kérosène).
- En haut, se trouvent les molécules plus légères, telles que le gaz ou les essences.

Deux distillations successives sont réalisées : une *distillation atmosphérique* et une *distillation sous vide* (Figure II.7).

<sup>44</sup> Source : connaissancecesenergies.org.

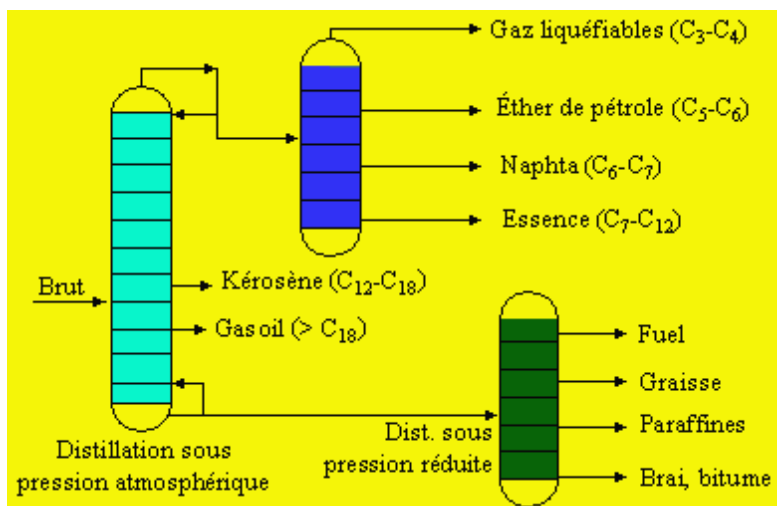


Figure II.7. Distillations atmosphérique et sous vide.<sup>45</sup>

### 1. Distillation atmosphérique (DAT)

L'opération consiste à séparer les différents composants d'un mélange liquide en fonction de leur température d'évaporation. Le pétrole brut est injecté dans une grande tour de distillation, où il est chauffé à environ 400 °C (Figure II.8). Les différents hydrocarbures contenus dans le pétrole brut sont vaporisés : d'abord les légers (tels que gaz, naphthas et essences), puis les moyens (diesel, kérosène et fioul domestique), et enfin une partie des lourds (fioul lourd, résidus atmosphériques). La température décroît au fur et à mesure que l'on monte dans la tour, permettant à chaque type d'hydrocarbure de se liquéfier afin d'être récupéré. Les plus légers sont récupérés tout en haut, et les plus lourds restent au fond de la tour.

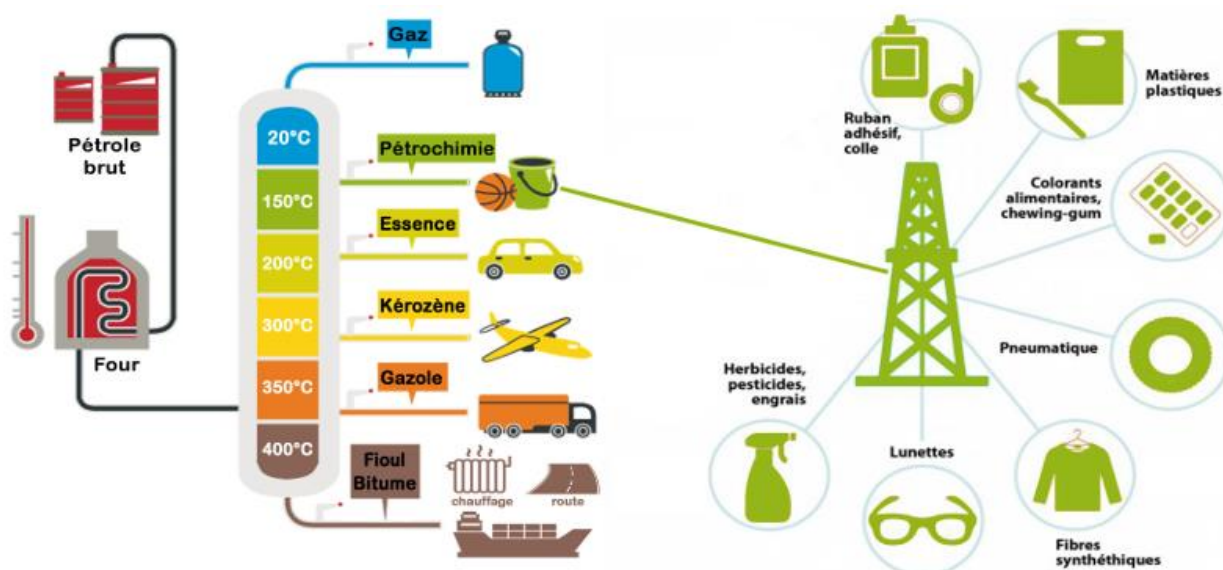


Figure II.8. Produits obtenus à partir de la distillation atmosphérique.<sup>46</sup>

<sup>45</sup> Source : le site de l'Université de Strasbourg (UMR 7509 CNRS), dans la section "Raffinage du pétrole" : chimie.ens.fr

<sup>46</sup> Source : « Distillation du pétrole » : futura-sciences.com

## 2. Distillation sous vide (DSV)

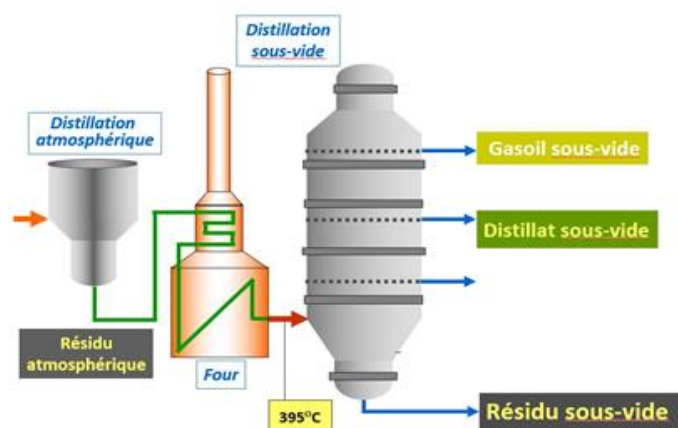
Après la première distillation, la partie résiduelle est envoyée dans une autre colonne, moins haute et comportant moins de plateaux, qu'on appelle la colonne de distillation sous vide. En effet, cette fraction résiduelle, appelée « résidu atmosphérique », contient des hydrocarbures à longues chaînes ; et plus les chaînes sont longues, plus elles sont fragiles, donc susceptibles d'être scindées (divisées) en plusieurs morceaux si le chauffage continue sous la pression atmosphérique.

Afin d'éviter ces coupures intempestives de chaînes, on fait la séparation des produits de ce résidu atmosphérique sous un vide relatif correspondant à une pression d'environ 40 mm de mercure (la pression atmosphérique correspond à 760 mm de mercure). Ce vide relatif permet d'abaisser la température d'ébullition des composants ; donc, il faut moins chauffer ces produits (**Figure II.9**).

Comme il a déjà été dit, le pétrole est un mélange d'hydrocarbures, et la distillation atmosphérique ne cherche pas à séparer les corps purs les uns des autres, mais seulement à les séparer en fractions. C'est aussi la première étape dans le traitement du pétrole.

- Le résidu atmosphérique est envoyé comme charge à l'entrée de la colonne sous vide. On peut donc soutirer, à la sortie de la colonne sous vide, du :
  - Gazole sous vide,
  - Distillat léger sous vide,
  - Distillat lourd sous vide,
  - Résidu sous vide.

Les deux premières fractions peuvent servir de compléments dans les différents mélanges de produits finis, mais aussi comme charges pour une unité de craquage catalytique. Quant au résidu sous vide, il va servir de charge au viscoréducteur.



**Figure II.9.** Procédé de la distillation sous vide.

### III.2.2. Procédés de CONVERSION

*Conversion : transformation des fractions lourdes en produits plus légers*

Après les opérations de séparation, les fractions lourdes restantes sont encore trop abondantes. Pour répondre à la demande en produits légers, on « casse » ces molécules lourdes en deux ou plusieurs molécules plus légères.

La conversion a pour objectif de transformer les molécules lourdes en produits plus légers. Elle permet ainsi d'obtenir de l'essence, du kérosène, du diesel ou du fioul domestique.

Différentes méthodes sont utilisées, notamment le craquage catalytique et l'hydrocraquage : le premier permet de décomposer les molécules lourdes sous l'effet d'un catalyseur et sous une très haute température (environ 500 °C) ; le second permet de produire du gazole sans soufre grâce à l'ajout d'hydrogène.

#### 1- Craquage catalytique

Le craquage catalytique est un procédé de raffinage qui a pour but de transformer, en présence d'un catalyseur, les coupes lourdes à longues chaînes d'hydrocarbures en coupes légères, utilisables dans la fabrication du carburant. En présence du catalyseur, à haute température (450 à 550 °C) et à pression atmosphérique, on casse les grosses molécules hydrocarbonées pour obtenir de petites molécules ayant un indice d'octane élevé.

Les *charges* qui alimentent le FCC viennent de la distillation sous vide ; ce sont les distillats léger et lourd sous vide.

##### - *Propriétés des essences de craquage*

Les essences de craquage ont des indices d'octane notablement supérieurs à ceux des essences directes. Ceci est dû au fait qu'elles contiennent une grande proportion d'hydrocarbures ramifiés et aromatiques, qui améliorent l'indice d'octane.

- Le fuel gaz.
- La coupe C<sub>3</sub>/C<sub>4</sub>.
- L'essence totale de FCC qui, après désulfuration, sera utilisée dans la fabrication des carburants.
- Le gazole léger de FCC, qui sera utilisé pour fabriquer le gazole moteur ou le gazole de chauffage.
- Le gazole lourd de FCC, qui sera utilisé dans la fabrication du fioul.

#### 2- Hydrocraquage

L'hydrocraquage est un procédé permettant de convertir des distillats lourds de pétrole en coupes légères. Ce procédé est mis en œuvre sous une forte température de l'ordre de 250 à 450 °C et une forte pression d'hydrogène (entre 50 et 150 bars), en présence d'un catalyseur. À cette

température, il y a craquage des molécules longues et apparition de molécules oléfiniques. Cependant, en présence d'hydrogène sous haute pression, il y a hydrogénation partielle de ces oléfines ainsi que des aromatiques formés.

Les *charges* utilisées dans ce procédé sont des distillats légers et lourds sous vide, ainsi que du distillat lourd de viscoréducteur.

### **3- Viscoréduction (ou visbreaking)**

La viscoréduction a pour objectif de transformer les résidus en coupes légères afin d'obtenir une meilleure valorisation. Afin de réduire la viscosité des coupes lourdes et des résidus visqueux, on utilise un procédé appelé viscoréduction, qui a pour but de transformer en partie les produits lourds en produits légers tout en réduisant la viscosité du résidu. En effet, c'est un craquage thermique de résidu atmosphérique ou sous vide, à sévérité généralement modérée. Les divers procédés de viscoréduction opèrent en phase liquide, entre 450 °C et 500 °C, sous une pression comprise entre 5 et 20 bars.

Les *charges* qui alimentent cette unité de raffinage viennent des distillations atmosphériques et sous vide, ainsi que du craquage catalytique ; ce sont :

- le résidu atmosphérique,
- le résidu sous vide,
- le gazole lourd de FCC.

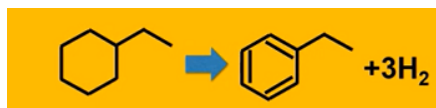
## **III.2.3. Procédés d'AMELIORATION**

### **1. Hydrotraitement**

L'hydrotraitement est un procédé clé du raffinage du pétrole, qui consiste à traiter les hydrocarbures en présence de dihydrogène (H<sub>2</sub>) et d'un catalyseur afin d'éliminer des impuretés indésirables telles que le soufre, l'azote, l'oxygène et les métaux, et de saturer les composés insaturés pour améliorer la qualité des produits finis.

### **2. Reformage catalytique (reforming)**

Le reformage catalytique est une méthode de raffinage qui permet de convertir les molécules naphthéniques en molécules aromatiques, lesquelles possèdent un indice d'octane élevé et servent de base dans la fabrication des carburants automobiles. Dans ce procédé, un catalyseur déclenche les réactions chimiques. Il s'agit donc de produire de l'essence à haut indice d'octane à partir du solvant fractionné dans la tour de distillation. Le reformat produit est utilisé comme constituant de base pour la fabrication des carburants automobiles, normaux et super.



### 3. L'isomérisation

Le procédé d'isomérisation sert à transformer les n-paraffines d'essence légère (gazoline) de faible indice d'octane en isoparaffines présentant des indices d'octane élevés, assez proches, pour certains, des indices d'octane des composés aromatiques. Plus la paraffine est branchée, plus l'indice d'octane est élevé. Ce procédé concerne les paraffines à 5 et 6 atomes de carbone constituant la coupe essence légère (n-pentane et n-hexane).



### 4. Déparaffinage, désasphaltage

Le déparaffinage et le désasphaltage sont deux procédés essentiels appliqués aux fractions lourdes du pétrole, visant à améliorer leur qualité pour la fabrication d'huiles de base lubrifiantes et de bitumes.

#### III.2.4. Mélange (blending)

- *Ultime étape : le mélange*

Lors du mélange, différents additifs sont ajoutés aux produits dans le but de garantir leurs spécificités techniques, réglementaires et environnementales. Cette étape vise également à optimiser les propriétés des produits finis, comme la résistance au froid pour la création d'un fioul domestique de qualité supérieure, par exemple.

- *La préparation finale des produits par mélange*

On obtient les produits finis par mélange des produits intermédiaires ou semi-finis.

Pour faire face à cette série d'opérations, les raffineries doivent disposer d'importants volumes de stockage, ainsi que d'installations de réception des produits bruts et d'expédition des produits finis.

La **Figure II.10** montre la chaîne pétrolière, de l'extraction au raffinage.<sup>47</sup>

<sup>47</sup> Source : Planète Énergies, "Du pétrole brut aux produits finis : le raffinage", Infographie,

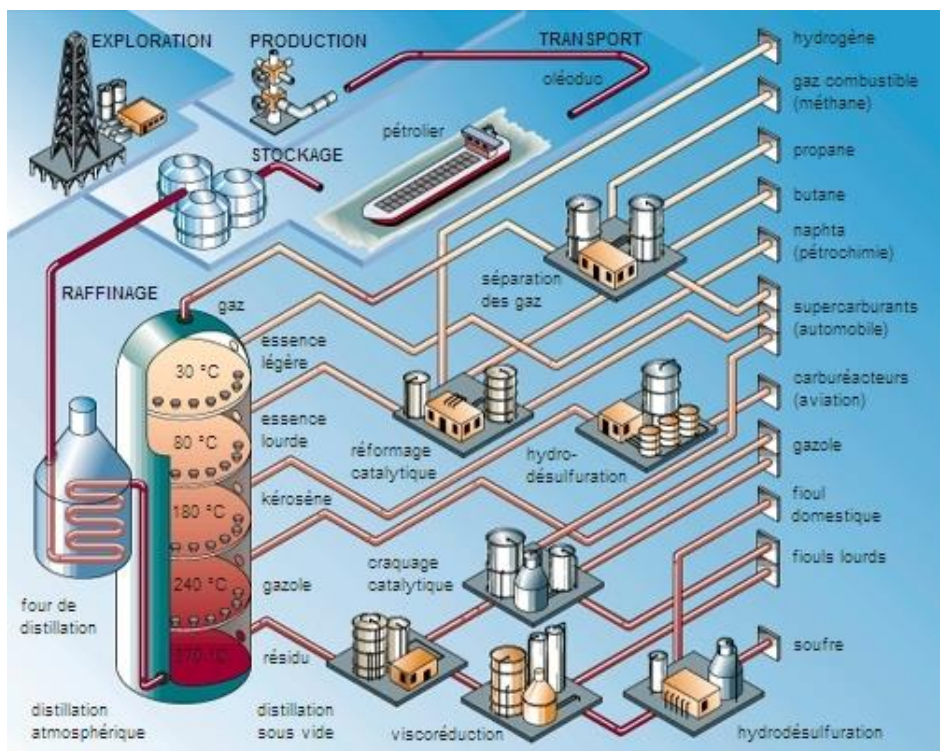


Figure II.10. Schéma général des procédés du raffinage du pétrole brut.

#### IV. Risques environnementaux

Faute d'avoir d'autres sources d'énergies alternatives et peu coûteuses, l'homme poursuit l'exploitation du pétrole, qui constitue une source d'énergie très utilisée dans l'industrie, les activités domestiques, le transport, etc.

Néanmoins, l'utilisation du pétrole présente plusieurs risques pour l'environnement (**Figure II.11**) :

*1. Les eaux usées contenant des produits chimiques peuvent avoir des effets néfastes si elles sont rejetées dans l'environnement :*

- La production pétrolière fait appel à de nouveaux produits chimiques : biocides, inhibiteurs de corrosion, agents antitartre et traitements de gaz.
- Les opérations de forage, de stockage, de nettoyage, ainsi que les déversements de pétrole risquent de polluer l'eau.
- Les eaux usées, contenant des résidus d'hydrocarbures et des additifs chimiques, ne doivent pas être rejetées dans l'environnement sans traitement préalable.

*2. Les produits pétroliers et gazeux sont inflammables et explosifs. Des déversements d'hydrocarbures peuvent se produire :*

- Les gaz ou les vapeurs de produits pétroliers sont très explosifs au contact de l'air. Ils sont aussi inflammables et doivent être tenus éloignés des flammes.

- Les déversements d'hydrocarbures peuvent polluer les fleuves, les océans et les terres.

**3. Les produits pétroliers et pétrochimiques peuvent polluer l'atmosphère :**

- Les vapeurs de produits pétrochimiques, comme le gazole et l'essence, polluent l'atmosphère.
- Les raffineries émettent différentes substances chimiques dans l'atmosphère et produisent des odeurs nauséabondes.
- Les réfrigérants utilisés dans les systèmes de refroidissement des gaz présentent des risques pour la santé.



**Figure II.11.** Pollution par le pétrole. <sup>48\_49\_50</sup>

**✚ Défis et Solutions**

L'impact environnemental des raffineries de pétrole est un problème complexe qui nécessite une approche multiforme. Bien que l'industrie soit confrontée à des défis importants, plusieurs solutions existent pour atténuer cet impact. En adoptant des technologies et des processus plus propres, en gérant efficacement les déchets dangereux, en prévenant les déversements de pétrole et en promouvant la durabilité, les raffineries peuvent minimiser leur impact sur l'environnement et protéger la santé humaine.

<sup>48</sup> Source : <https://wwz.cedre.fr/Ressources/Accidentologie/Accidents/Deepwater-Horizon/Lutte-en-mer>

<sup>49</sup> Source : [https://fr.freepik.com/photos-premium/oiseau-est-mort-par-pollution-par-hydrocarbures-environnement\\_2400102.htm](https://fr.freepik.com/photos-premium/oiseau-est-mort-par-pollution-par-hydrocarbures-environnement_2400102.htm)

<sup>50</sup> Source : <https://biology-igcse.weebly.com/water-pollution.html>

## CHAPITRE III.

### Schémas de Fabrication Pétrochimique - Fabrication Industrielle du PVC

#### Introduction

La pétrochimie représente un secteur clé de l'industrie moderne. À partir de ressources fossiles ou de biomasse, elle fournit des matières intermédiaires telles que les oléfines et les aromatiques, qui servent de base à la fabrication de nombreux objets pour usage quotidien.

La pétrochimie est le secteur ayant consommé le plus de pétrole en 2017 (14 % de la consommation mondiale). Juste après les transports (56 %), elle devance le bâtiment (8 %) et la production d'électricité (5 %). Une tendance qui devrait s'accélérer dans les années à venir.

D'ici à 2030, la pétrochimie représentera plus d'un tiers de la consommation mondiale de pétrole, et près de la moitié à l'horizon 2050, augmentant au passage la consommation mondiale de 7 millions de barils par jour.

Selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE), les produits pétrochimiques devraient également absorber 56 milliards de mètres cubes supplémentaires de gaz naturel d'ici à 2030, et 83 milliards de mètres cubes d'ici à 2050<sup>51</sup>.



**Figure III.1.** L'industrie pétrochimique - Total Petrochemicals en Corée du Sud<sup>52</sup>.

#### I. Diversité des produits de l'industrie pétrochimique

Un produit pétrochimique est un produit chimique élaboré à partir du pétrole, qui est devenu un élément essentiel de l'industrie chimique moderne. En tant qu'industriel

<sup>51</sup> Source : connaissance des énergies.org

<sup>52</sup> Source : TOTAL - Le site pétrochimique de Samsung-Total Petrochemicals à Daesan, en Corée du Sud.

pétrochimique, vous avez un rôle crucial dans la fabrication de produits chimiques à partir de matières premières dérivées du pétrole brut et du gaz naturel.

Cette industrie est une branche de l'industrie chimique et transforme des hydrocarbures en une variété de produits chimiques de base, de polymères et de composés chimiques spécialisés.

Voici quelques-unes des principales activités de l'industrie pétrochimique :

1. **Production de produits chimiques de base** : L'industrie pétrochimique produit un large éventail de produits chimiques de base, tels que l'éthylène, le propylène, le butadiène, le benzène, le toluène et d'autres composés. Ces produits chimiques servent de matières premières pour la fabrication d'une multitude de produits finis.
2. **Fabrication de polymères** : Les polymères, tels que le polyéthylène, le polypropylène, le PVC (chlorure de polyvinyle), le PET (polyéthylène téréphtalate), etc., sont fabriqués à partir de monomères pétrochimiques. Ces polymères sont utilisés dans la production de plastiques et de nombreux autres produits.
3. **Production de produits plastiques** : L'industrie pétrochimique est un fournisseur majeur de matières premières pour la fabrication de produits plastiques, qui sont utilisés dans une vaste gamme d'applications, notamment les emballages, les pièces automobiles, les appareils électroniques, les jouets, etc.
4. **Fabrication de produits chimiques spécialisés** : En plus des produits chimiques de base, l'industrie pétrochimique produit également des composés chimiques spécialisés utilisés dans divers secteurs, tels que l'industrie pharmaceutique, l'industrie agricole, l'industrie des revêtements, etc.
5. **Carburants et lubrifiants** : L'industrie pétrochimique est liée à la production de carburants, notamment l'essence, le diesel et le kérosène, ainsi que de lubrifiants pour moteurs.
6. **Produits de consommation** : De nombreux produits de consommation courants, tels que les détergents, les produits de nettoyage, les produits de soins personnels, les textiles et les fibres synthétiques, sont également fabriqués à partir de composés produits par l'industrie pétrochimique.

- *Les ressources de la filière :*

Les ressources fossiles comme le gaz, le charbon et le pétrole servent essentiellement à fournir de l'énergie pour le chauffage et le transport. La pétrochimie récupère environ 10 % de ces ressources sous forme de produits raffinés, notamment :

- Le NAPHTA, une essence lourde, qui est la matière première la plus utilisée par l'industrie pétrochimique.
- L'ETHANE, qui provient du gaz naturel.

## II. Procédés de la pétrochimie

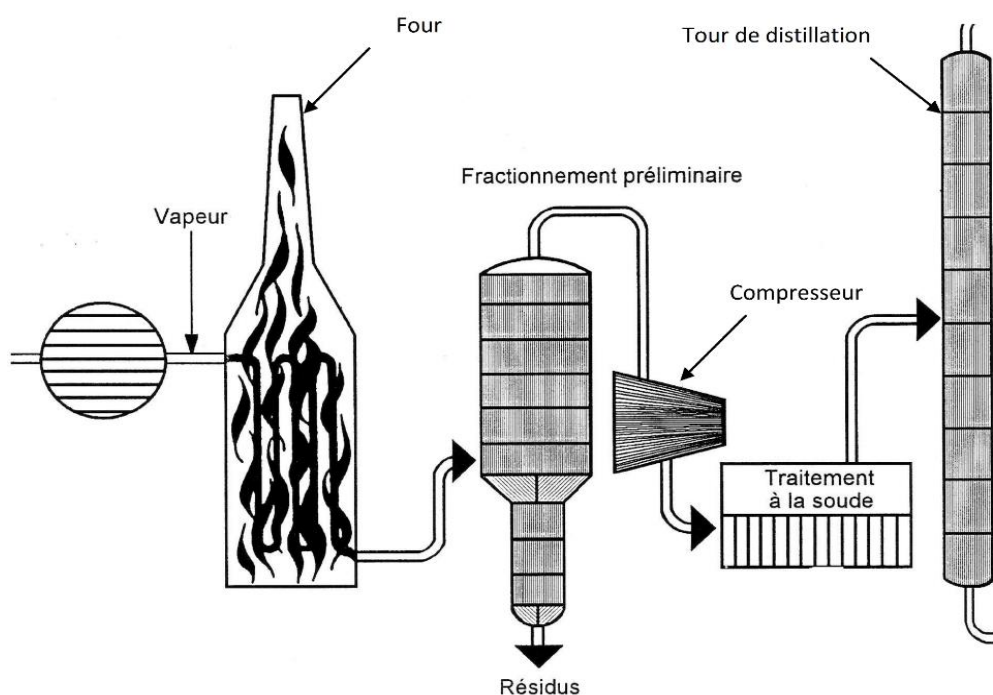
L'industrie pétrochimique élabore des « intermédiaires » grâce à deux procédés principaux :

### II.1. Vapocraquage

Le vapocraquage (« steam cracking » en anglais) est un procédé pétrochimique qui consiste à obtenir, à partir d'une coupe pétrolière telle que le naphta, ou d'alcane légers, des alcènes (éthylène, propylène) mieux valorisés. À haute température et en présence de vapeur d'eau, les longues molécules contenues dans le naphta sont rompues en chaînes plus petites. On obtient ainsi des hydrocarbures plus légers, les oléfines (éthylène, propylène, butène, butadiène).

Les installations de vapocraquage (**Figure III.2**) sont constituées d'un organe principal : le four, conçu pour chauffer le mélange vapeur d'eau + naphta jusqu'à une température de base, puis le porter brutalement à une température très élevée pendant un temps très court.

Cette version clarifie les phrases et utilise des virgules et des deux points pour mieux structurer les idées, tout en conservant la précision technique du procédé.



**Figure III.2.** Schéma simplifié du procédé de vapocraquage.<sup>53</sup>

<sup>53</sup> Source : Futura Sciences, « Vapocraquage », <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/chimie-vapocraquage-13117/>

## II.2. Reformage catalytique

Le reformage catalytique permet d'obtenir, à partir des essences lourdes, des bases à haut indice d'octane qui entrent dans la composition des carburants. Il produit également de l'hydrogène et des GPL (propane et butane). Le reformage s'effectue par passages successifs de la charge (essence lourde + hydrogène) dans des fours et des réacteurs contenant un lit catalytique (voir **Figure III.3**).

À plus de 500 °C, dans une tour de distillation, le naphta donne des molécules aromatiques comme le benzène ou le toluène - deux solvants très utilisés par l'industrie chimique - ainsi que les xylènes. Les oléfines et les molécules aromatiques subissent ensuite de nouvelles réactions pour conduire aux produits finis.

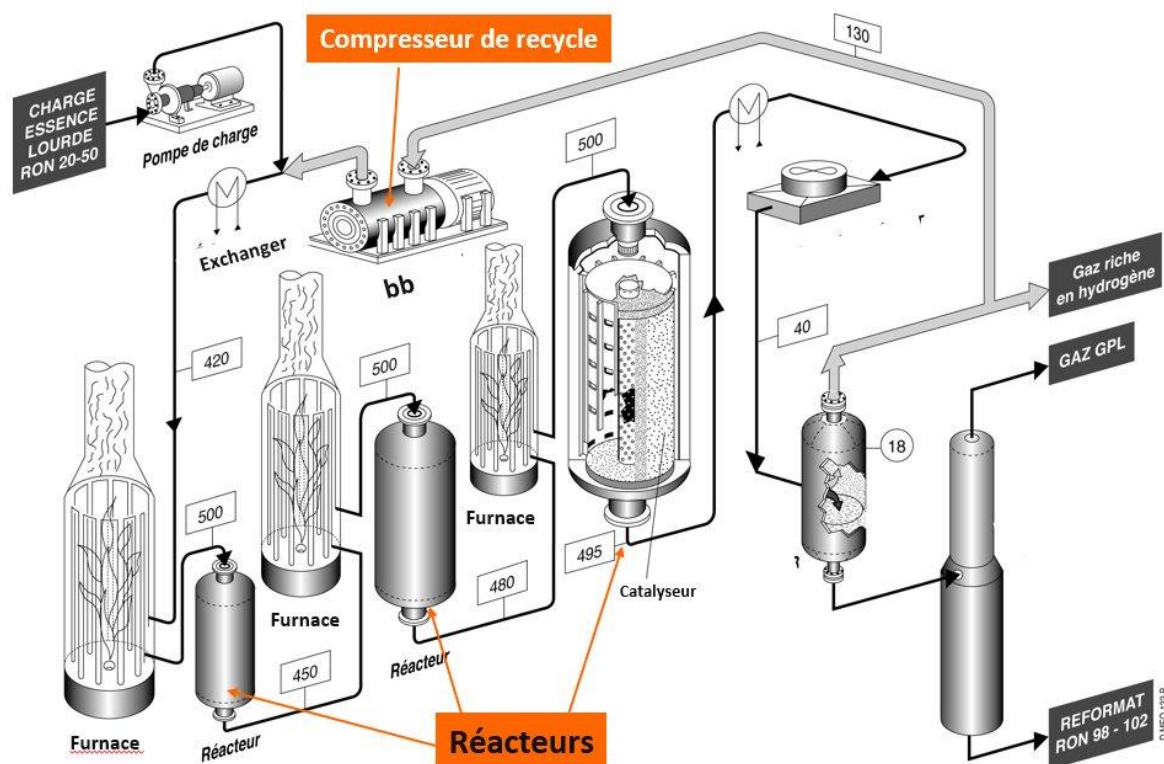


Figure III.3. Schéma simplifié d'une unité de reformage catalytique.<sup>54</sup>

## III. Exemple de procédé - Fabrication Industrielle du PVC

La pétrochimie est la science qui s'intéresse à l'utilisation des composés chimiques de base issus du pétrole pour fabriquer d'autres composés synthétiques, qui peuvent exister ou non dans la nature. Ces fabrications sont, en général, basées sur des réactions chimiques appropriées, en

<sup>54</sup> Source : Techno-Science.net - Schéma de reformage catalytique.

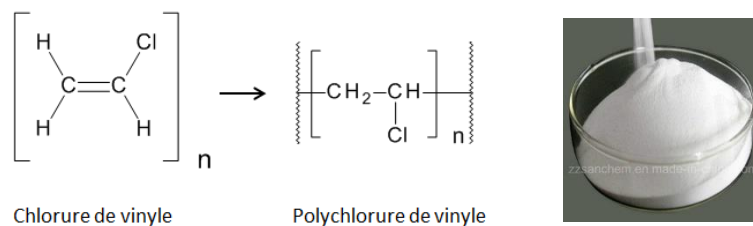
présence ou non d'un catalyseur. Ainsi, à partir du pétrole, on peut fabriquer des matières plastiques de toutes sortes, employées ensuite comme matières premières dans les secteurs de la construction, de l'industrie électrique, de l'électronique, du textile, de l'aéronautique, et autres.

### III.1. Définition

Les matières plastiques sont constituées de chaînes polymérisées de molécules carbonées, aujourd'hui presque toujours dérivées du carbone fossile (pétrole), et dans lesquelles sont insérées diverses molécules d'additifs - colorants, agents assouplissants, agents anti-feu, pigments ou charges - qui atteignent souvent 50 % du poids du matériau commercialisé.

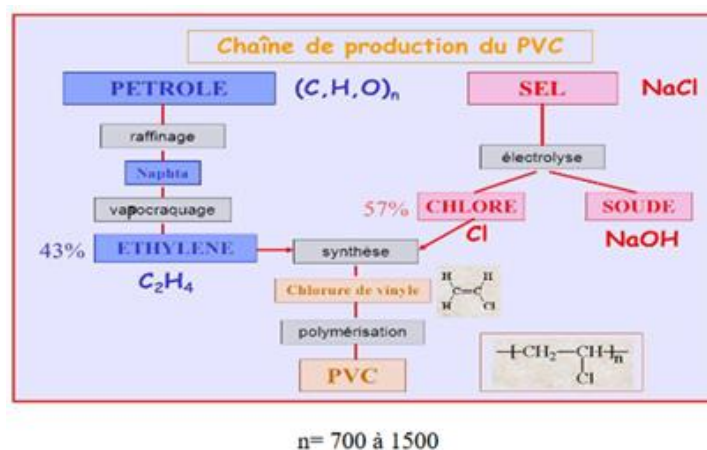
### III.2. POLY (CHLORURE DE VINYLE) OU PVC

Le PVC est un polymère thermoplastique obtenu par polymérisation radicalaire du monomère de chlorure de vinyle (CVM), ou monochloréthylène. Il a été découvert en 1835 par le physicien français Victor Regnault. Le premier brevet a été déposé en 1914 par l'Allemand Friedrich Klatte, et la production industrielle du PVC a débuté en 1935.



### III.3. Fabrication du PVC

Le PVC est préparé (**Figure III.4**) à partir de deux matières premières : à 57 % de sel de mer (NaCl) et à 43 % de pétrole ; c'est la seule matière plastique constituée de plus de 50 % de matière première d'origine minérale.



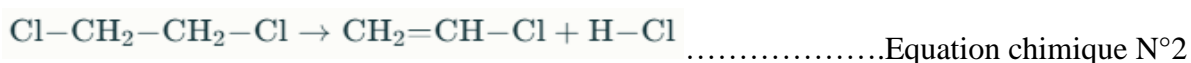
**Figure III.4.** Schéma de production du PVC.

- *Synthèse du CHLORURE DE VINYLE*

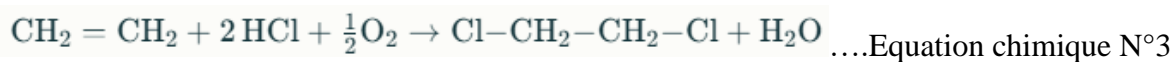
Le chlorure de vinyle est fabriqué industriellement à partir de l'éthylène et du chlore. En présence de chlorure ferreux (FeCl<sub>3</sub>), agissant comme catalyseur, ces composants produisent du dichloroéthane (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>Cl<sub>2</sub>), suivant l'équation chimique :



Cette réaction se produit dans un bain de dichlorure d'éthylène en ébullition. À la température de 500 °C et à haute pression (30 atmosphères), le dichlorure d'éthylène se décompose pour produire du chlorure de vinyle et de l'acide chlorhydrique :



En pratique industrielle, l'acide chlorhydrique produit lors de cette étape est mélangé avec de l'oxygène, puis mis à réagir avec de l'éthylène additionnel, en présence de chlorure de cuivre agissant comme catalyseur, pour produire davantage de dichlorure d'éthylène par l'intermédiaire de la réaction suivante :



**III.4. Procédé de fabrication industrielle du PVC**

Le PVC est produit par la polymérisation du monomère de chlorure de vinyle (VCM). Les principaux procédés de fabrication du PVC - polychlorure de vinyle - comprennent la polymérisation en suspension, en émulsion et en masse. Environ 80 % de la production utilise la polymérisation en suspension.

Tout d'abord, le VCM est mis sous pression et liquéfié, puis introduit dans le réacteur de polymérisation, qui contient préalablement de l'eau et des agents de suspension (**Figure III.5**). Ensuite, l'amorceur est introduit dans le réacteur, et le PVC est produit sous quelques bars de pression, à une température comprise entre 40 et 60 °C. Le rôle de l'eau est d'évacuer et de contrôler la chaleur dégagée lors du processus de polymérisation. Le PVC forme de minuscules particules qui croissent et, lorsqu'elles atteignent la taille souhaitée, la réaction est arrêtée. Tout le chlorure de vinyle non réagi est éliminé par distillation et réutilisé.

Le PVC est ensuite séparé et séché pour former une poudre blanche, également connue sous le nom de résine de PVC (voir schéma). La polymérisation en émulsion produit des particules de taille plus fine, requises pour certaines applications.

Le processus de fabrication du polychlorure de vinyle (PVC) peut varier, selon les technologies et les équipements utilisés par les fabricants spécifiques.

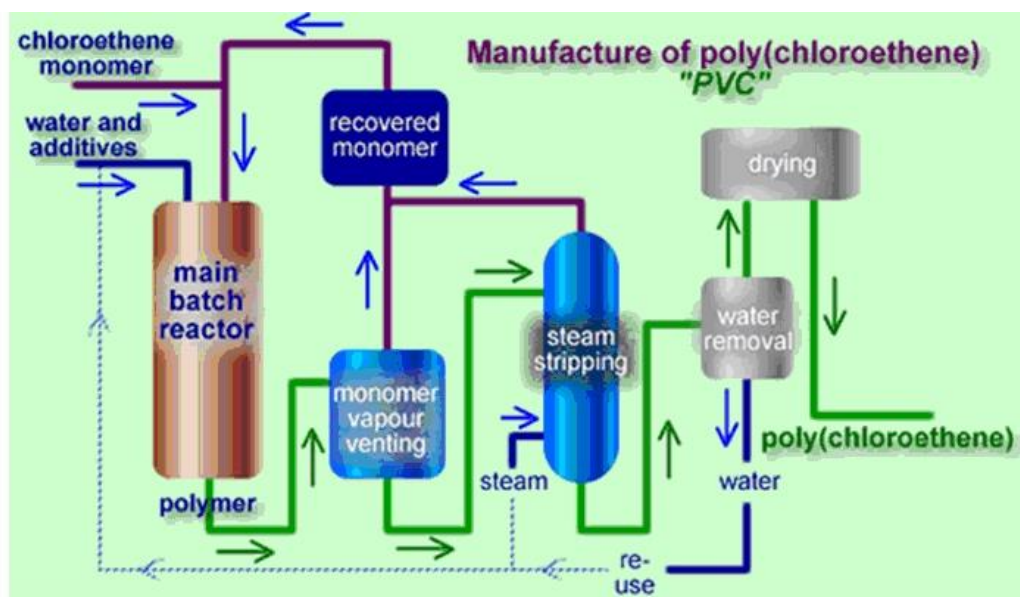


Figure III.5. Procédé de fabrication industrielle du PVC.<sup>55</sup>

### III.5. Types de PVC

On distingue en général trois types de PVC :

1. Le **PVC rigide**, qui concerne majoritairement les tuyaux de canalisation. Ces derniers représentent environ 40 % de la consommation de PVC.
2. Les **films de PVC plastifié**, que l'on trouve en bobines ; ils servent de films adhésifs ou de films étirables.
3. Le **PVC souple**, qui sert en général à recouvrir certains objets, comme les manches de petit outillage. Le PVC souple (plastifié) représente environ 30 % de la consommation de PVC.

### III.6. Applications du PVC

- PVC dans les applications médicales
- PVC dans les transports
- PVC dans le bâtiment et la construction
- PVC dans les jouets
- PVC en emballage
- PVC en art et design

<sup>55</sup> Source: Essential Chemical Industry – Manufacture of poly(chloroethene) (PVC).  
<https://www.essentialchemicalindustry.org/polymers/poly-chloroethene.html>

### III.7. Caractéristiques du PVC

- Solidité : résistance mécanique et légèreté.
- Durée de vie : plus de 30 ans pour les fenêtres, et plus de 60 ans pour les canalisations.
- Facilité d'entretien : nettoyage à l'éponge ou à la serpillière.
- Résistance au feu : retardateur de flamme.
- Isolation : thermique, phonique, électrique.
- Économie : excellent rapport qualité/prix.
- Créativité : illimitée.
- Recyclabilité : à 100 %.
- Hygiène : haute qualité sanitaire.

#### 🔗 Remarque

Parmi les nombreux polymères produits via la pétrochimie, les polyoléfines occupent une place majeure. Parmi ces polymères à grande diffusion, on trouve notamment le *polyéthylène* (PE) et le *polypropylène* (PP), qui sont des polymères de synthèse très largement utilisés dans de multiples secteurs industriels.

Les méthodes industrielles de production de ces deux polymères sont présentées en annexe (hors programme).

### IV. Risques environnementaux pour le secteur de la pétrochimie

Les usines de l'industrie pétrochimique et plasturgique présentent divers risques, tant sur le plan environnemental que sur celui de la santé humaine. Voici quelques-uns des risques associés à ces industries :

1. **Pollution de l'air** : les usines pétrochimiques émettent souvent des composés organiques volatils (COV), des particules fines et d'autres polluants atmosphériques. Ces émissions peuvent avoir des effets néfastes sur la qualité de l'air, entraînant des problèmes respiratoires et d'autres troubles de santé chez les populations avoisinantes.
2. **Pollution de l'eau** : les déversements accidentels ou les rejets intentionnels de substances chimiques peuvent contaminer les eaux environnantes, affectant les écosystèmes aquatiques et pouvant avoir des conséquences sur la santé humaine, notamment en contaminant les sources d'eau potable.
3. **Déversements accidentels** : les usines pétrochimiques manipulent souvent des substances dangereuses. En cas de défaillance des équipements, de fuites ou d'accidents, des produits chimiques toxiques peuvent être libérés dans l'environnement, entraînant des risques pour la santé humaine et la faune.

4. **Incendies et explosions** : en raison de la nature inflammable de nombreux produits chimiques utilisés dans l'industrie pétrochimique, les installations sont exposées au risque d'incendies et d'explosions. Cela peut entraîner des blessures graves, des pertes de vies humaines et des dégâts matériels importants.
5. **Émissions de gaz à effet de serre** : la production de plastiques et d'autres produits de l'industrie pétrochimique peut contribuer aux émissions de gaz à effet de serre, aggravant le problème du changement climatique.
6. **Impact sur la biodiversité** : les activités industrielles peuvent dégrader les habitats naturels, entraînant la perte de biodiversité. Les rejets de produits chimiques dans l'eau peuvent avoir des effets dévastateurs sur les écosystèmes aquatiques.
7. **Déchets plastiques** : l'industrie plastique génère d'énormes quantités de déchets, dont une partie peut se retrouver dans les océans et les écosystèmes, créant des problèmes environnementaux majeurs et menaçant la vie marine.
8. **Risques pour la santé des travailleurs** : les travailleurs des usines pétrochimiques et plasturgiques peuvent être exposés à des substances chimiques toxiques, ce qui peut entraîner des problèmes de santé à long terme, notamment des maladies respiratoires, des troubles neurologiques et des cancers.

### **Défis et Solutions**

Comme tout secteur d'activité, l'industrie pétrochimique applique la réglementation en matière de sécurité environnementale (ISO 14001, procédure REACH...).

La gestion appropriée des risques, la mise en œuvre de technologies plus propres, la conformité réglementaire stricte et l'adoption de pratiques durables sont cruciales pour minimiser les impacts négatifs de l'industrie pétrochimique et plasturgique sur l'environnement et la santé humaine.

Différentes actions, telles que l'incinération des déchets, le traitement des eaux utilisées ou l'installation de systèmes de sécurité, permettent de réduire l'impact sur l'environnement.



ANNEXE

V. Procédés de fabrication industrielle du polyéthylène et du polypropylène

V.1. Procédé industriel de fabrication du polyéthylène (PE)

Le polyéthylène (PE) est une famille de polymères thermoplastiques largement utilisés, issus de la polymérisation de l'éthylène.

Le procédé industriel le plus utilisé pour la fabrication du polyéthylène (PE), notamment du polyéthylène haute densité (PEHD), est la polymérisation en phase gazeuse à basse pression.

- Description du procédé (Figure III.6)

Le procédé de fabrication du polyéthylène (PE) en phase gazeuse consiste à faire réagir de l'éthylène gazeux dans un réacteur à lit fluidisé en présence d'un catalyseur (souvent à base de chrome ou de métallocène). La polymérisation se déroule à basse pression (généralement inférieure à 2 MPa) et à une température modérée (environ 85 à 140 °C). Le PE se forme sous forme de particules solides, tandis que les gaz non réagis sont recyclés dans le réacteur. Ce procédé ne nécessite pas de solvants, ce qui réduit les coûts et l'impact environnemental.

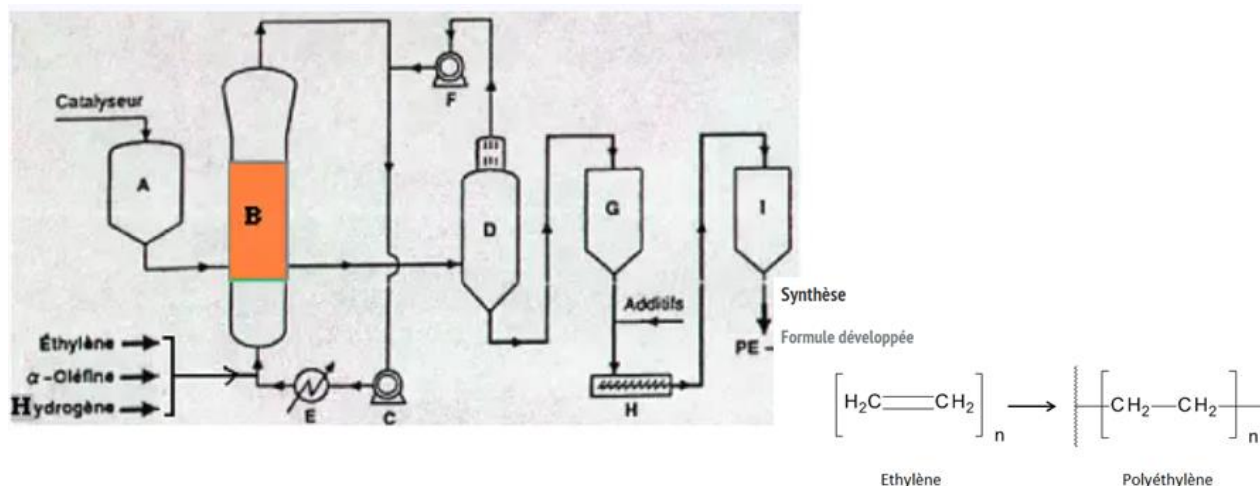


Figure III.6. Procédé de fabrication industrielle du PE.<sup>56</sup>

V.2. Procédé industriel de fabrication du polypropylène (PP)

Le polypropylène (PP) est un polymère thermoplastique très polyvalent, largement utilisé dans de nombreux secteurs industriels grâce à ses propriétés mécaniques, chimiques et thermiques avantageuses.

<sup>56</sup> Sources :

Valco Group – Process de fabrication du PP  
 Techniques de l'Ingénieur – Description des procédés Polypropylènes  
 Université d'El Oued – Polypropylènes  
 Techniques de l'Ingénieur – Principe des procédés Polypropylènes



**Références bibliographiques**

- [1] ASPO France. (2016). *Pétrole conventionnel et non conventionnel*, sur <https://aspofrance.org/2016/petrole-conventionnel-non-conventionnel>.
- [2] Colombano, S., Saada, A., Victore, E., Guérin, V., & Zornig, C. (2014). *Nature des produits pétroliers et origines du vieillissement : tentative de l'identification de la source via la prise en compte des impacts et l'analyse de l'âge approximatif des déversements*.
- [3] Généralités sur les gisements d'hydrocarbures. (2023). *Les gisements d'hydrocarbures dans le Bugey*, sur [www.u-picardie.fr/beauchamp/GazSchiste/presentation\\_JB-1-2-3-4.htm](http://www.u-picardie.fr/beauchamp/GazSchiste/presentation_JB-1-2-3-4.htm)
- [4] Speight, J. G. (2016). *Handbook of petroleum product analysis* (2nd ed.). CD&W Inc.
- [5] Wuithier, P. (Éd.). (1972). *Le pétrole, raffinage et génie chimique* (2e éd., 2 vol.). Éditions Technip.
- [6] Wauquier, J.-P. (1994). *Le raffinage du pétrole. Tome 1 : Pétrole brut, produits pétroliers, schémas de fabrication*. Éditions Technip.
- [7] Wauquier, J.-P., Leprince, P., Trambouze, P., & Favennec, J.-P. (1998). *Le raffinage du pétrole* (5 tomes). Technip.
- [8] Chitour, C.-E. (s.d.). *Raffinage du pétrole (Tome 1)*. Office des Publications, Alger.
- [9] Normand, X. (1977). *Leçons sommaires sur l'industrie du raffinage du pétrole*. Éditions Technip.
- [10] U.S. Environmental Protection Agency. (1995). *Profile of petroleum refining industry (EPA/310-R-95-013)*. Office of Enforcement and Compliance Assurance.
- [11] ENSPM Formation Industrie - IFP Training. (2005). *Procédés et unités de raffinage : reformage catalytique – isomérisation*.
- [12] Techniques de l'Ingénieur. (n.d.). *Raffinage pétrole*. Office de la documentation technique, sur <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/energies-th4/combustibles-fossiles-42215210/petrole-be8520/raffinage-be8520v2niv10004.html>
- [13] Saeki, Y., & Emura, T. (2002). *Technical progresses for PVC production*. *Progress in Polymer Science*, 27, 2055–2131.