



La République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et la Recherche Scientifique
Université Abdel Hamid Ben Badis – Mostaganem
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie des Procédés



Polycopié de Cours

Impacts industrie pétrochimique sur l'environnement

Destiné au : 2^{ème} année Master, Filière : Industries Pétrochimiques

Option : Génie Pétrochimique

Réalisé par :

Dr. AGUEDAL Hakim

Année Universitaire : 2019/2020

Avant-propos

Dans le présent polycopié intitulé « Impacts industrie pétrochimique sur l'environnement », qui s'adresse aux étudiants deuxième année LMD, Master en Génie Pétrochimique. Ce module s'inscrit dans le domaine de « l'Industries Pétrochimiques », discipline se situant à la base de tout domaine faisant intervenir des Procédés de pétrochimie, Traitements et industrie du gaz naturel et Stockage et transport des produits pétroliers. Il est rédigé de manière simplifiée et quelques exemples sont introduits après avoir donné des notions afin que l'étudiant puisse assimiler le contenu du cours et son application dans la vie courante.

L'objectif réel de cet enseignement est de maîtriser l'analyse des effets sur l'environnement, cerner et évaluer les risques d'incidences environnementales découlant d'un projet prévu ou un accident imprévu et éclairer les décideurs. Il vise aussi à améliorer la décision par une prise en compte explicite et sélective des considérations environnementales, établir des mesures adoptées pour contrer les effets environnementaux négatifs ou pour les réduire à des niveaux acceptables au préalable et favoriser l'intégration des objectifs fondamentaux que sont la protection de l'environnement et le développement durable.

Ce polycopié est divisé en quatre chapitres. Le contenu du premier chapitre concerne l'origine, production et traitement du pétrole, le deuxième chapitre résume quelques impacts de la pollution par les hydrocarbures, le troisième chapitre est axé sur les traitement des eaux usées en général et enfin le quatrième chapitre est consacré au traitement de la pollution par les hydrocarbures et les différentes interventions techniques.

Plan de cours

Avant-propos.....	1
-------------------	---

Chapitre I :

Généralité sur le pétrole Origine, Formation et Exploitation

I.1. Origine du pétrole.....	1
I.2. Formation du pétrole	2
De la matière organique au pétrole.....	3
I.3. Migration de pétrole	6
I.3.1. Migration primaire	6
I.3.2. Migration secondaire.....	6
I.4. Piégeage de pétrole	8
I.4.1. Pièges structuraux	8
I.4.2. Pièges stratigraphiques	8
I.5. Exploration et exploitation de pétrole en Algérie	9

Chapitre II :

Impacts de la pollution par les hydrocarbures

II.1. Enjeux financiers et macroéconomiques.....	10
II.1.1. Pour les pays importateurs	10
II.1.2. Pour les pays exportateurs	11
II.2. Enjeux environnemental.....	11
II.2.1. Pollution atmosphérique par les hydrocarbures	12
II.2.2. Pollution du sol par les hydrocarbures	14
II.2.3. Pollution des mers et des océans par les hydrocarbures.....	16
II.2.3.1 Les marées noires	17
II.2.3.2. Origines des marées noires :.....	17
II.2.3.3. Conséquences des marées noires	18

Chapitre III :
Traitements des eaux usées en général

III.1. Prétraitement ou traitement primaire :.....	21
III.1.1. Dégrillage.....	21
III.1.2. Dilacération.....	21
III.1.3. Tamisage	21
III.1.4. Dessablage.....	22
III.1.5. Dégraissage - Déshuilage.....	22
III.1.6. Décantation.....	22
III.2. Traitement secondaire :	23
III.2.1. Traitement physico-chimique	23
III.2.2. Traitement biologique	24
III.2.3. Traitements tertiaires	27

Chapitre IV :
Traitement de la pollution par les hydrocarbures

VI.1. Lutte contre les marées noires.....	30
VI.2. Traitements des sols et sous-sols.....	32
VI.2.1. Technique de traitement in situ	33
La Bio-traitabilité d'un site	33
Procédés appliqués	33
Facteurs influençant la biodégradation.....	36
VI.2.2. Technique de traitement ex situ	37
VI.1.2.1. Le traitement en bio réacteur	37
VI.1.2.2. La biodégradation en « tas ».....	38
Exposés et travaux dirigés.....	41
Références Bibliographiques.....	42

Chapitre I : Généralité sur le pétrole

Origine, Formation et Exploitation

Ce chapitre est une initiation à la production du pétrole. Cela va permettre de mieux cerner les impacts sur l'environnement que peuvent avoir cette activité industrielle.

I.1. Origine du pétrole

Le pétrole en latin petroleum, qui signifie du grec petra « roche ou pierre », et oleum « huile ». Connue aussi comme : l'huile de pierre, l'huile minérale naturelle ou l'or noir. Il est issu d'un mélange variable d'hydrocarbures (molécules composées d'atomes de carbone et d'hydrogène) associé à d'autres atomes, principalement du soufre, d'azote et d'oxygène, et dans certains cas avec des métaux. Son exploitation comme source d'énergie fossile, constitue l'un des piliers de l'économie industrielle contemporaine. Il fournit ainsi la quasi-totalité des carburants liquides. Les produits issus du raffinage du pétrole sont ainsi utilisés dans la pétrochimie (caoutchoucs, plastiques, textiles, chimie...etc).

L'explication de l'origine du pétrole par l'évolution géochronologique a été formulée au début du XIXe siècle. Elle était fortement basée sur des théories impliquant des mécanismes inorganiques. Des chercheurs Russes, ont supposé :

- Des théories cosmiques, dans lesquelles les hydrocarbures sont les restes d'une atmosphère primitive de la Terre.
- Des synthèses de type minéral qui prennent lieu à grande profondeur dans le sous-sol. Cette hypothèse est proche d'être soutenable par la présence des substances actives qui ne peuvent pratiquement être synthétisés que par les micro-organismes, comme :
 - ✓ Les porphyrines ¹ dont leur structure dérive directement de la chlorophylle des plantes.

¹ **Porphyrines** : ce sont des pigments dont la molécule à structure cyclique impliquée dans le transport du dioxygène. Sous forme de chlorines, elles entrent également dans la composition des chlorophylles, et occupent des fonctions physiologiques fondamentales, dans toutes les cellules vivantes (aussi bien végétales qu'animales). Le caractère fluorescent est la propriété physique naturelle de ces composés.

- ✓ Les isoprénoïdes ², hydrocarbures issus de la chaîne phytol de la chlorophylle.
- ✓ Les stéroïdes et triterpénoïdes ³ composés caractéristiques de la matière vivante.

Donc, le pétrole, est le fruit d'une décomposition lente de la matière organique, souvent végétale, qui se dépose sur le fond des océans et qui se transforme sous l'effet de la température et de pression en pétrole par des processus chimiques sur des millions d'années. Des scientifiques ont réussi à produire du pétrole à l'aide de certains types d'algues.

I.2. Formation du pétrole

Le pétrole est un combustible fossile dont la formation date d'environ 20 à 350 millions d'années (ère **Paléozoïque (250-550 Ma)**, période **Carbonifère (250-350 Ma)** et ère **Mésozoïque (66-250 Ma)**, période **Crétacé (65-145 Ma)**). Les gisements plus récents connus remontent à 4000 ans.

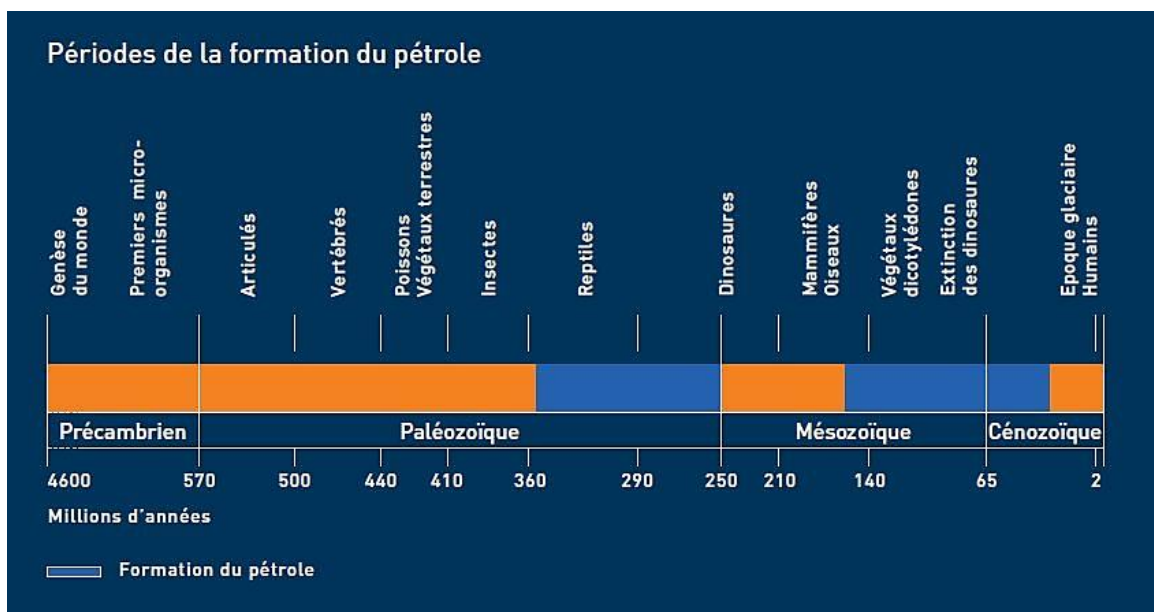


Figure 1 : Périodes géochronologiques de la formation du pétrole.

² **Isoprénoïdes** : ce sont des métabolites importants rencontrés chez tous les êtres vivants. Ils interviennent dans le métabolisme primaire, dans les fonctions vitales comme la photosynthèse, la respiration, les hormones de croissance ...etc. Dans le métabolisme secondaire, ils permettent à la plante de s'adapter à son milieu et d'assurer sa protection contre les prédateurs et parasites.

³ **Triterpénoïdes** : 6 unités isopréniques, en C30.

La formation du pétrole passe par trois phases successives :

- **L'accumulation de matière organique dans les sédiments.** Cette matière est majoritairement d'origine végétale ;
- **La maturation du kérogène en pétrole.** La matière se transforme en Kérogène, et puis sous l'effet de pression et de température ce dernier subit une décomposition thermique, appelée pyrolyse. Plus le sédiment est profond et chaud, plus la part du gaz (hydrocarbures légers) est importante ;
- **La migration et le piégeage.** Sous la pression croissante, les hydrocarbures expulsés (plus légers que l'eau), s'échappent vers la surface où ils sont oxydés, ou biodégradés en bitumes. Une minime quantité est resté piéger dans la « roche-réservoir », et ne peut pas s'échapper à cause d'une couche imperméable fermée « roche couverture » formant la source d'un futur gisement de pétrole.

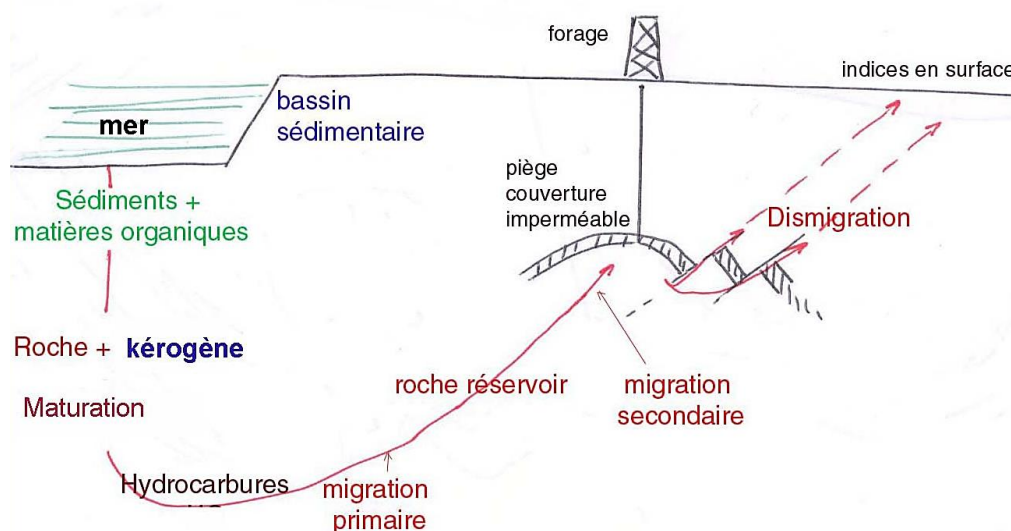


Figure 2 : Schéma des différentes phases de formation de pétrole.

De la matière organique au pétrole

La matière organique est issue d'êtres vivants (plancton, végétaux, animaux, etc.), composée essentiellement du carbone, d'hydrogène, d'oxygène et d'azote. Cette biomasse est généralement détruite par des bactéries mais une faible partie (moins de 1 %) se dépose au fond de milieux aquatiques (océans, lacs...etc).

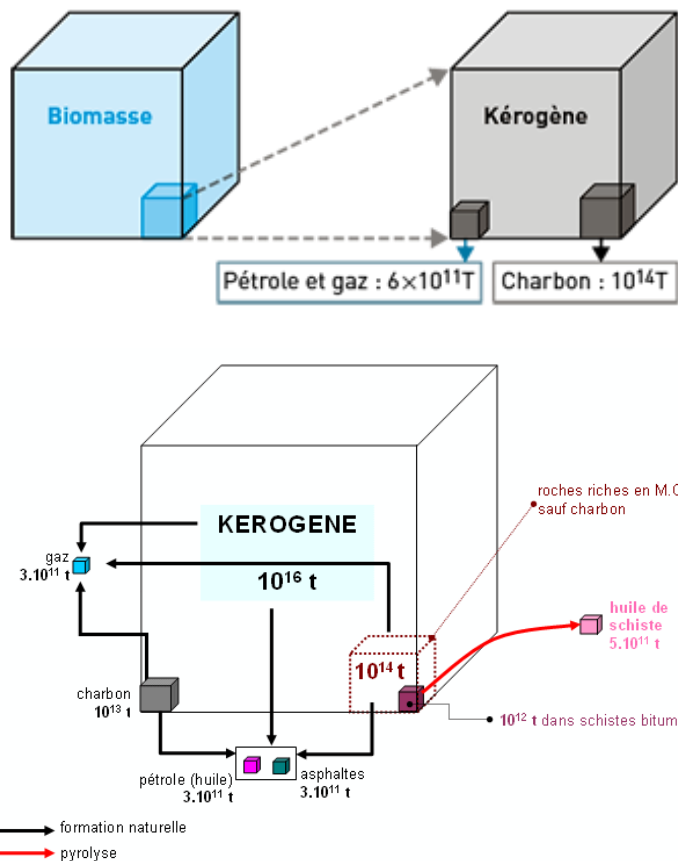


Figure 3 : Quantité de biomasse sédimentée converti en pétrole.

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 de ce fait des boues de sédimentation. Celles-ci s'accumulent par couches successives sur des dizaines voire des centaines de mètres.

A une profondeur d'environ 1000 mètres et sous l'action des bactéries anaérobies, la matière organique contenue dans les boues de sédimentation subit une transformation, en extrayant l'oxygène et l'azote aboutissant à la formation du kérogène. Il s'agit d'un composé solide disséminé dans la roche sous forme de petits grumeaux, contenant surtout du carbone et de l'hydrogène.

Au fur et à mesure que de nouvelles couches de sédiments se déposent au-dessus de cette strate. Par leurs propres masses, les couches sédimentaires s'enfoncent naturellement dans la croûte terrestre. Au cours de ce phénomène les résidus minéraux des boues de sédimentation se solidifient en une roche relativement imperméable appelée « roche-mère ».

Le kérogène piégé dans la roche-mère est soumis à des pressions et des températures géothermiques de plus en plus élevées (augmentant d'environ 3°C tous les 100 mètres). À une température supérieure à 60°C, ce qui correspond à un enfouissement d'environ 1 500 à 2 000 mètres, le kérogène subit lentement un craquage thermique, appelé « pyrolyse ». Le mélange d'hydrocarbures liquides est appelé pétrole brut. Des hydrocarbures sous forme gazeuse (méthane) sont également générés lors de la transformation du kérogène. Lorsque la roche-mère n'est pas suffisamment enfouie, le kérogène qu'elle contient ne subit pas de pyrolyse. Appelé schiste bitumineux, il s'agit d'un combustible fossile arrêté au stade « avant-pétrole » dans le processus de maturation du kérogène. Par un procédé industriel, les schistes bitumineux peuvent être transformés en pétrole en subissant une pyrolyse (à 500° C pour accélérer la maturation du kérogène).

La proportion du gaz au sein de la roche-mère est d'autant plus élevée quand la durée et la température de transformation du kérogène sont importantes :

- entre 60° et 120°C (entre 2 000 à 3 000 mètres de profondeur), le kérogène produit principalement du pétrole et une faible quantité de gaz ;
- à partir de 120°C (soit 3 000 mètres), la production de pétrole à partir du kérogène devient insignifiante. Les hydrocarbures liquides présents dans la roche-mère sont à leur tour transformés en molécules de gaz sous l'effet de la température et de pression ;
- au-delà de 150°C (soit un enfouissement supérieur à 4 000 mètres), il ne se forme que du gaz.

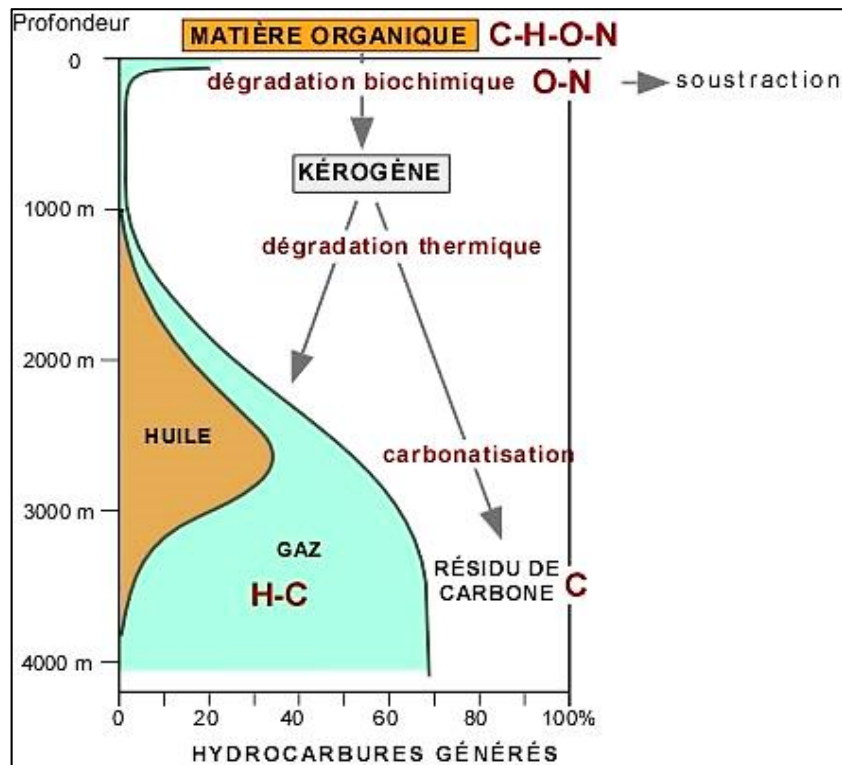


Figure 4 : Types d'hydrocarbures générés à partir du kérogène en fonction de la profondeur d'enfouissement.

I.3. Migration de pétrole

Le pétrole est une matière première facilement exploitable lorsqu'il se concentre dans un réservoir par des phénomènes de migration.

I.3.1. Migration primaire

Le pétrole brut est initialement contenu dans la roche-mère, celle-ci continue de s'enfouir et se tasse peu à peu sous le poids des couches supérieures. Cela, a pour effet d'augmenter la pression, en créant des fissures au sein de la roche-mère. L'eau, le pétrole et le gaz issus de kérogène peuvent être expulsés de leur formation d'origine et échappés vers une future roche-réservoir, on parle alors une « migration primaire » qui s'opère à faible distance.

I.3.2. Migration secondaire

Les hydrocarbures se séparent ensuite de l'eau à cause de leur différence de densité. Les hydrocarbures échappés ont tendance à remonter jusqu'à la surface de la terre par migration ascendante dans la structure des couches rocheuses environnantes. Durant leur remontée, les hydrocarbures peuvent rencontrer un obstacle géologique imperméable (faille, pli, anticlinal,...etc) : ils sont dans ce cas

bloqués et stockés dans une zone perméable « roche-réservoir » (généralement du sable, des carbonates ou des dolomites) surplombée par une couche imperméable « roche-couverture » (composée d'argile, de schiste et de gypse).

En l'absence d'un système de piégeage, les hydrocarbures expulsés s'échappent jusqu'à la surface : on parle alors de « dysmigration » où ils sont oxydés, ou biodégradés (ce dernier cas donne des sables bitumineux), les combustibles fossiles produits sont alors des pétroles dits « lourds » ou « extra-lourds ». Les hydrocarbures atteignant la surface peuvent être utilisés comme des indices de surface pour détecter un bassin sédimentaire susceptible de contenir du pétrole lors des prospections.

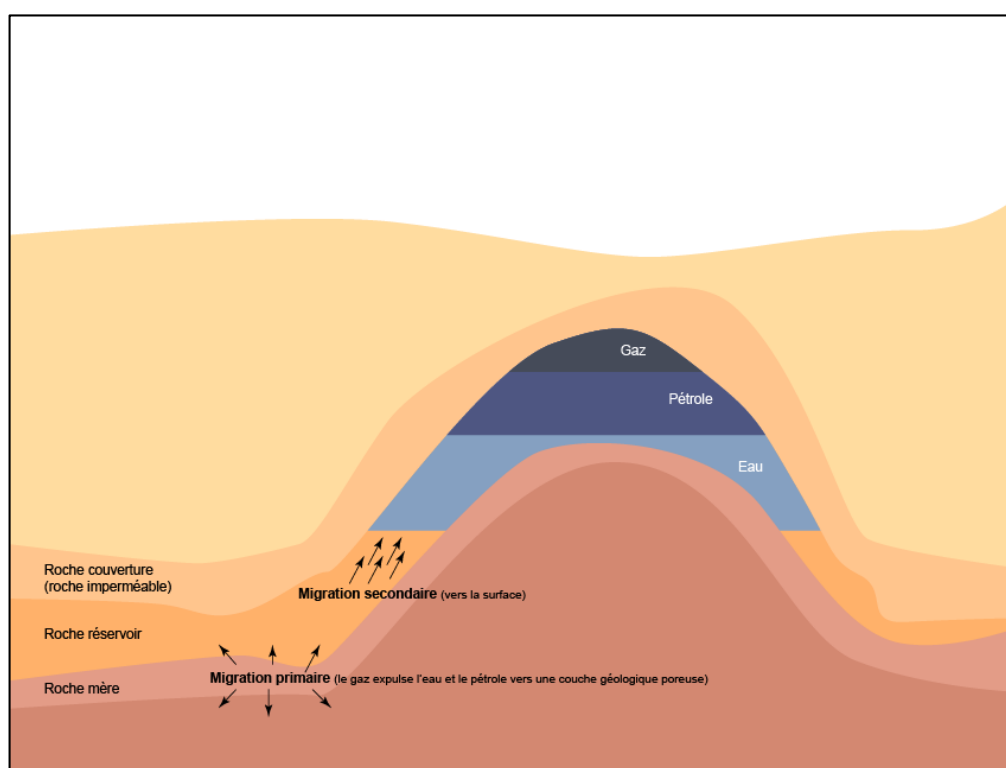


Figure 5 : Migrations primaire et secondaire du pétrole
(Source : *Connaissance des Énergies*).

Seule une partie du pétrole brut est concentrée dans les roches-réservoirs. En effet, 10 à 40% des hydrocarbures restent piégés dans la roche-mère, de manière disséminée. Le pétrole de roche-mère est connu sous le nom de « huile de schiste » ou de « pétrole de schiste ». Moins facile à extraire que le pétrole sous forme de gisements, il requiert des techniques d'exploitation particulières comme la fracturation hydraulique (des techniques alternatives sont également à l'étude).

I.4. Piégeage de pétrole

Il existe plusieurs types de pièges en fonction de la déformation des roches au cours des phénomènes géologiques :

I.4.1. Pièges structuraux

- Les plus grands gisements (environ 80%) sont en général logés dans des pièges anticlinaux. Roches plissées en forme de voûte créées par les mouvements terrestres.
- On trouve aussi des pièges sur faille ou mixtes anticlinal-faille. Dans ce cas, la migration du pétrole est obstruée par une couche imperméable formée lors de la création d'une faille.

I.4.2. Pièges stratigraphiques

Des pièges ont également été formés par la traversée des couches perméables par un dôme salin (appelés diapirs), qui constitue à son tour une roche-couverture en subdivisant les réserves de pétrole.

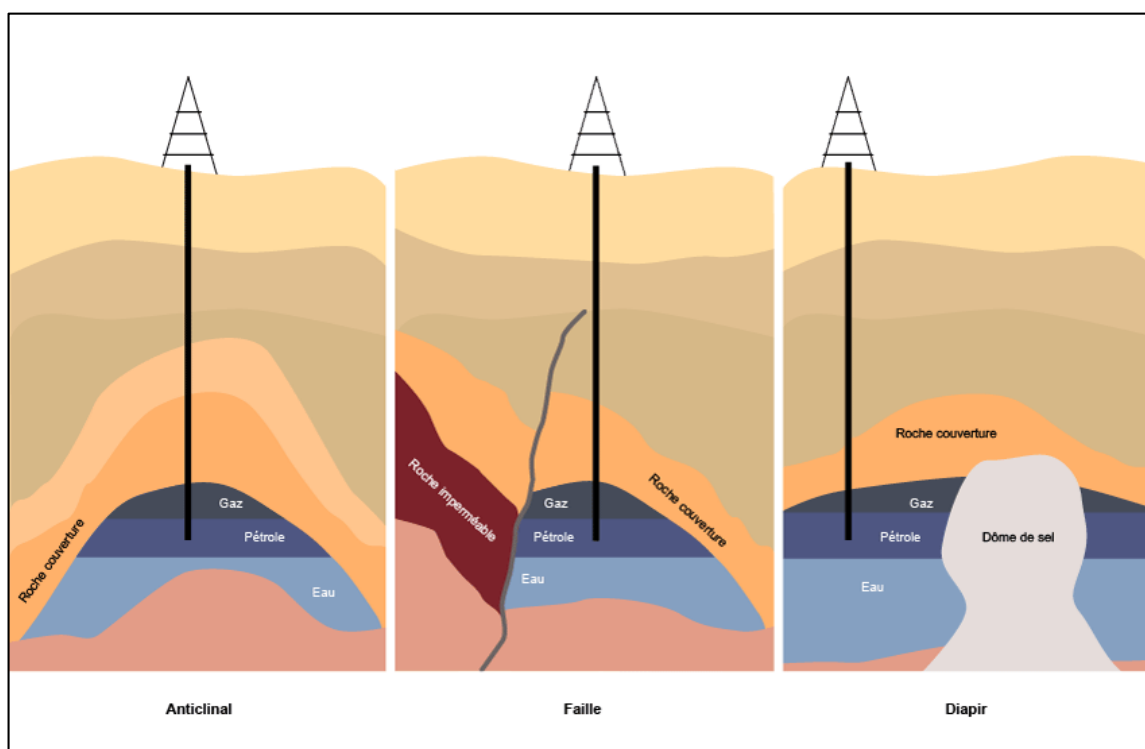


Figure 6 : Les principaux types de pièges à pétrole
(Source : *Connaissance des Énergies*).

I.5. Exploration et exploitation de pétrole en Algérie

Au début des années 1950 les compagnies pétrolières ont lancé les premières études géologiques du sous-sol saharien. Certaines, comme la société américaine Gulf Oil Corporation, avaient conclu que, en l'absence de traces d'hydrocarbures, il n'y avait aucun intérêt à ce que des recherches systématiques y soient entreprises. D'autres, tel que le Bureau de Recherches Pétrolières (BRP), un organisme public français, réalisait en 1952 un premier forage d'exploration infructueux dans la région du M'Zab.

L'intérêt grandissant, le gouvernement français décida en 1953 d'attribuer les premiers permis de recherches, dont allaient bénéficier aux quatre grandes compagnies françaises : la Société Nationale de Recherches et d'Exploitation des Pétroles en Algérie (S. N.REPAL, créée en 1946), la Compagnie Française des Pétroles Algérie (C.F.P.A), la Compagnie de Recherches et d'Exploitation Pétrolières au Sahara (C.R.E.P.S) et la Compagnie des Pétroles d'Algérie (C.P.A).

La première découverte d'hydrocarbures est intervenue en 1954 : une grosse accumulation de gaz a été trouvée à Djebel Berga au sud d'In-Salah dont les réserves étaient estimées à 100 milliards de m³ (mais, faute de débouchés commercial, il faudra attendre plus de cinquante ans avant que l'on songe à exploiter ce gisement, qui fait aujourd'hui partie d'un ensemble de parcelles où opère la compagnie britannique British Petroleum, en partenariat avec la société nationale algérienne, la Sonatrach).

C'est en janvier 1956 que le pétrole a été découvert pour la première fois au Sahara, à Edjeleh, dans la région d'In Amenas. La découverte du plus grand champ pétrolier algérien, Hassi Messaoud est intervenue en juin de la même année.

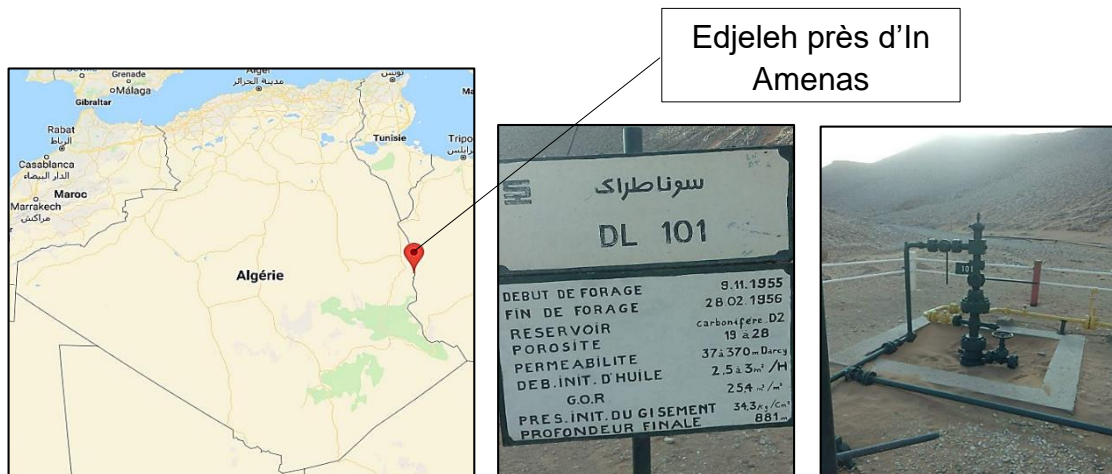


Figure 7 : Premier forage réalisé en Algérie en 1956 à Edjeleh.

Chapitre II : Impacts de la pollution par les hydrocarbures

Dans ce chapitre, est résumé quelques impacts de la pollution par les hydrocarbures.

Les hydrocarbures sont encore trop fréquemment privilégiés comme principale source d'énergie à travers le monde. La production et la consommation de ces derniers connaissent un développement extraordinaire. Cette ressource, qui est très polluante, a la problématique d'être non renouvelable.

Les hydrocarbures présentent deux principaux impacts :

- Impact économique et,
- Impact environnemental.

II.1. Enjeux financiers et macroéconomiques

La baisse du prix du pétrole entraîne un transfert de richesse des pays exportateurs de pétrole vers les pays importateurs de pétrole.

II.1.1. Pour les pays importateurs

- Cette baisse constitue une bonne nouvelle pour les pays importateurs car elle leur permet de réduire le montant de leur dépense énergétique, ce qui a un effet favorable sur la consommation et la croissance.
- Ce surcroît de croissance donne lieu à des besoins en importations accrus, et donc une demande étrangère adressée au pays plus élevée. Les exportations vont augmenter et amplifier le mouvement positif de soutien à la demande interne.
- Cette baisse favorise la compétitivité de leurs entreprises et en particulier celles qui exercent leurs activités dans les secteurs intensifs en énergie comme les transports.

II.1.2. Pour les pays exportateurs

A l'inverse, l'effet est particulièrement notable pour les pays exportateurs de pétrole surtout pour ceux qui n'ont pas une économie diversifiée et dont les coûts d'extraction du pétrole sont élevés.

- L'impact du choc pétrolier est clairement négatif, qui peut conduire à un brutal ralentissement de l'activité économique éventuellement accentué par une rigueur budgétaire.
- La baisse des prix du pétrole a un impact immédiat sur les marchés des changes à travers la chute des devises, entraînant une dégradation du rendement de l'industrie pétrolière, de moindres rentrées de devises et une baisse des recettes fiscales⁴.
- Cette moindre demande adressée des pays exportateurs de pétrole n'est cependant pas suffisante pour neutraliser l'impact positif sur la croissance des économies importatrices.
- Enfin, la baisse des revenus des pays exportateurs de pétrole réduit leurs importations. Il en résulte des pertes d'activité pour ces derniers qui viennent atténuer l'effet positif sur perspectives de croissance.

II.2. Enjeux environnemental

Le pétrole provoque des pollutions directes mais aussi indirectes notamment par l'intermédiaire de ses dérivés :

- Par exemple, il y a la combustion des carburants qui entraîne une pollution atmosphérique.
- Il y a aussi une dégradation de la faune et de la flore à cause des plastiques.

La persistance et la toxicité des différents types d'hydrocarbures varient d'un composé à l'autre en fonction de leur structure chimique.

- La solubilité aqueuse des hydrocarbures décroît avec l'augmentation du nombre d'atomes de carbone, alors que la toxicité aquatique augmente. Les Hydrocarbures Polycycliques Aromatiques (HAP) avec trois ou plusieurs

⁴ Les recettes fiscales désignent les recettes provenant des impôts sur le revenu et les bénéfices, des cotisations de sécurité sociale, des taxes prélevées sur les biens et les services, des prélèvements sur les salaires, des impôts sur le patrimoine et des droits de mutation, ainsi que d'autres impôts et taxes.

cycles benzéniques et de haut poids moléculaire sont les plus toxiques tandis que les composés de faible poids moléculaires avec un ou deux cycles benzéniques sont relativement moins solubles dans l'eau et présentent une plus faible toxicité.

- Les composés de faible poids moléculaire sont plus volatils que ceux ayant un poids moléculaire élevé. Plus le nombre de cycles de benzène est important, plus la toxicité des HAP, est élevée.

Les expériences de toxicité chez l'animal ont montré que certains hydrocarbures aromatiques polycycliques pouvaient induire spécifiquement de nombreux effets sur la santé, des effets systémiques (hépatiques, hématologiques, immunologiques et développement d'athéroscléroses), et/ou des effets sur la reproduction ainsi que des effets génotoxiques et cancérigènes.

La toxicité est également influencée par d'autres facteurs tel que :

- La quantité d'hydrocarbure,
- Le type d'hydrocarbure et les toxicités relatives des composants,
- La fréquence et le temps de l'exposition incluant la persistance des résidus,
- Les conditions de l'huile (l'épaisseur de la nappe, la nature de l'émulsification et le degré d'altération),
- Les variables environnementales qui affectent l'exposition et la toxicité (le temps, les conditions climatiques et la présence d'autres polluants).

II.2.1. Pollution atmosphérique par les hydrocarbures

Il existe des masses de dérivés pétroliers comme :

- Le pétrole libère du dioxyde de carbone (CO_2) qui est un gaz à effet de serre. Les rejets du CO_2 provoquent l'acidification des océans. Au premier abord, c'est un mécanisme positif qui agit comme un très important tampon freinant l'augmentation de la concentration en CO_2 dans l'atmosphère et donc l'effet de serre. L'acidification peut avoir des conséquences graves sur la vie sous-marine. Par exemple, les coquilles de certains crustacés pourraient littéralement être dissoutes.

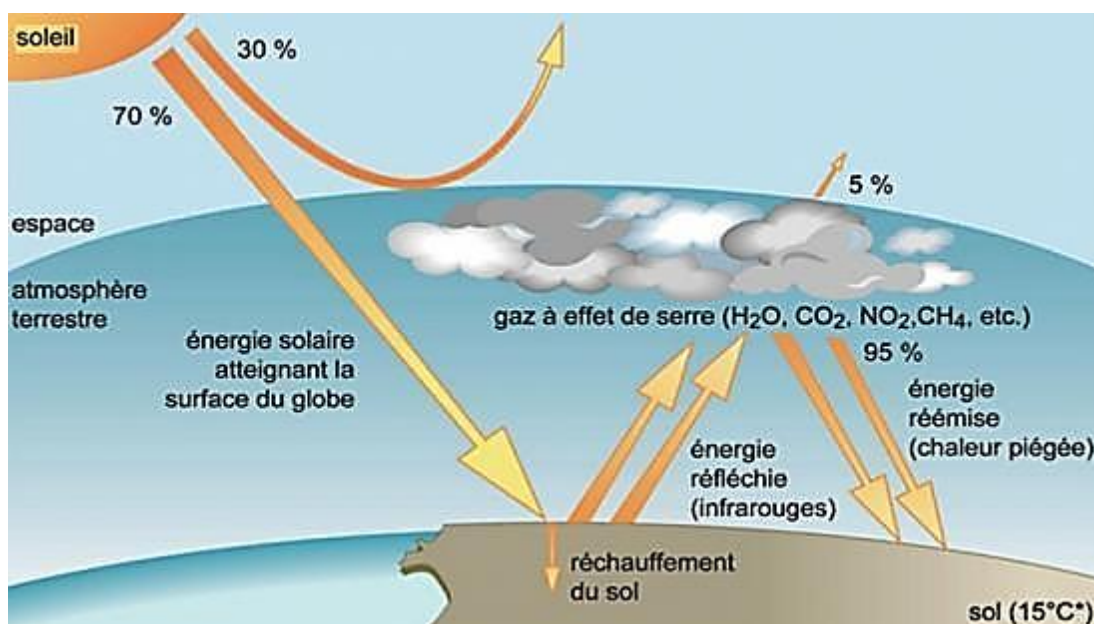


Figure 8 : Effet de serre.

- La combustion des essences dans les moteurs crée une pollution de l'atmosphère par les gaz d'échappements.
- D'autres gaz nocifs sont libérés lors de cette combustion comme le monoxyde de carbone et le dioxyde d'azote et il y a aussi des hydrocarbures non brûlés. Ces gaz sont à l'origine de pluies acides qui détruisent la végétation ainsi que les milieux aquatiques fermés.

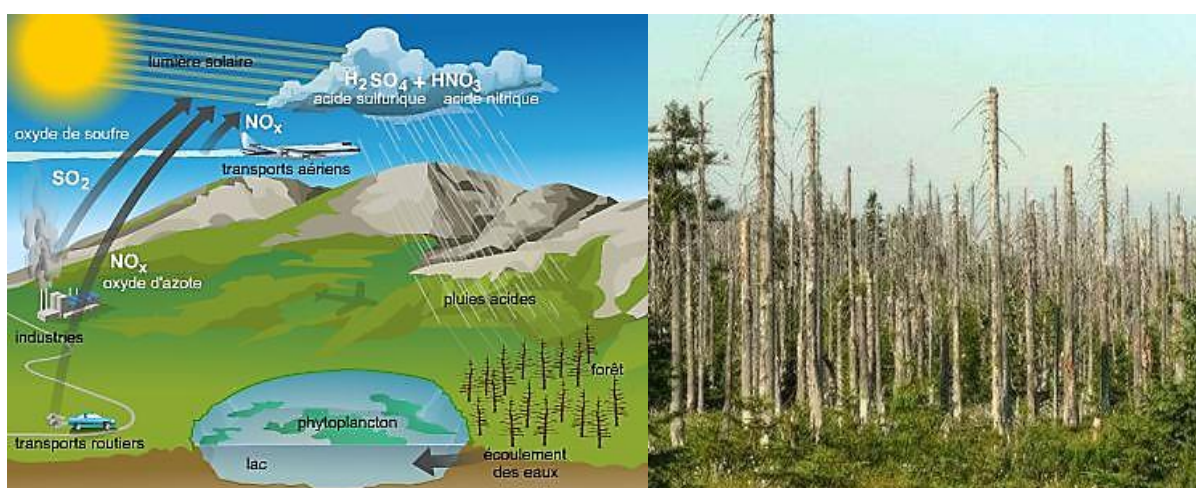


Figure 9 : Conséquences des pluies acides sur les forêts.

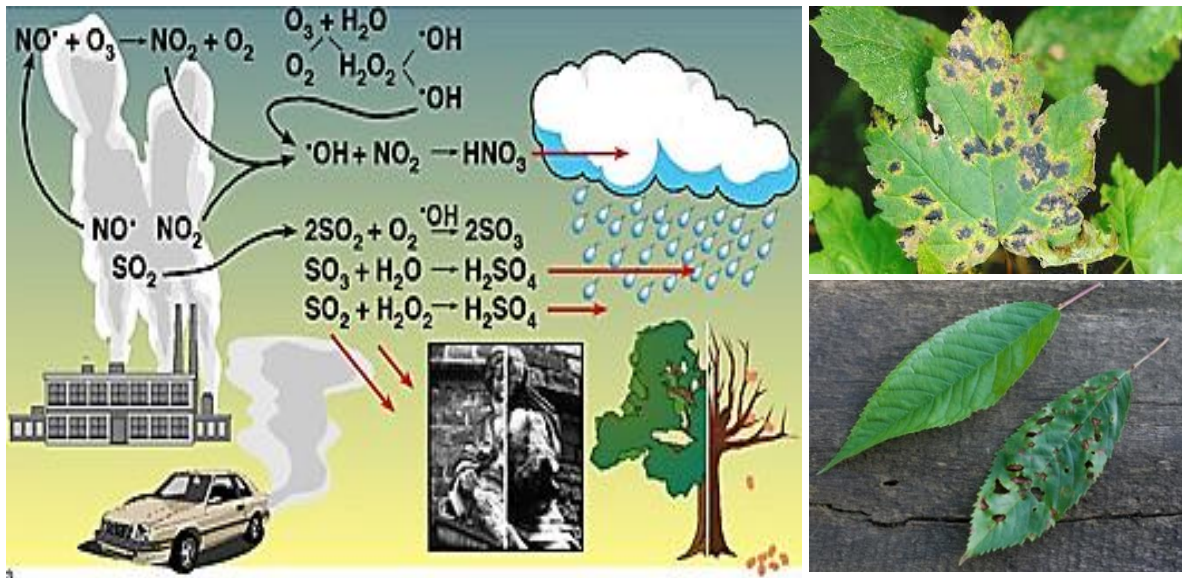


Figure 10 : Origine des pluies acides.

- Certains polluants sont dispersés dans l'air comme la suie. Cette dernière est un composé non brûlé par les moteurs diesel. Ces polluants sont très dangereux car ils sont la principale cause d'asthme, d'allergies ou encore de cancer.



Figure 11 : Pollution atmosphérique par émissions de la suie.

Cependant, des efforts sont réalisés pour diminuer ces émissions néfastes. Des biocarburants sont introduits dans les essences. Des moteurs solaires et électriques sont créés tandis que les chercheurs se penchent sur la création d'énergie propre et de nouveaux carburants.

II.2.2. Pollution du sol par les hydrocarbures

L'ère industrielle a engendré une pollution importante des sols et sous-sols par des mélanges complexes de substances organiques et inorganiques parmi lesquelles on retrouve les hydrocarbures, les solvants chlorés, les métaux, ...etc.

Ces pollutions issues par la plupart de déversements accidentels ou ponctuels résultant de comportements délibérés ou non, de fuites de réservoirs de stockage constituent un problème environnemental majeur notamment terme de risque de transfert d'hydrocarbures vers les nappes phréatiques, mais également un risque humain non négligeable.

- La pollution des sols par les hydrocarbures résulte généralement de l'infiltration à partir de la surface ou de l'enfouissement de produits pétroliers ou de résidus hydrocarbonés.
- La pollution des aquifères par des hydrocarbures solubles résulte d'un contact de la nappe d'eau avec un produit infiltré ou enfoui ou parfois provient d'une rivière polluée en charge par rapport à une nappe alluviale.
- En fonction du volume déversé, de sa nature, des caractéristiques géologiques et hydrogéologiques du sous-sol, le produit pétrolier en tant que phase liquide peut rester entièrement piégé au-dessus de la nappe phréatique ou atteindre celle-ci si le volume infiltré est supérieur au volume piégé, le volume excédentaire s'étalant à la surface de la nappe.

Les sols contaminés par les hydrocarbures présentent un danger lors d'un contact direct avec l'homme ou l'animal ou lors de leur transfert dans les chaînes alimentaires. C'est le phénomène de bioaccumulation avec le piégeage par les végétaux et les animaux des polluants ou de leurs produits de dégradation jusqu'à des teneurs atteignant les seuils de toxicité

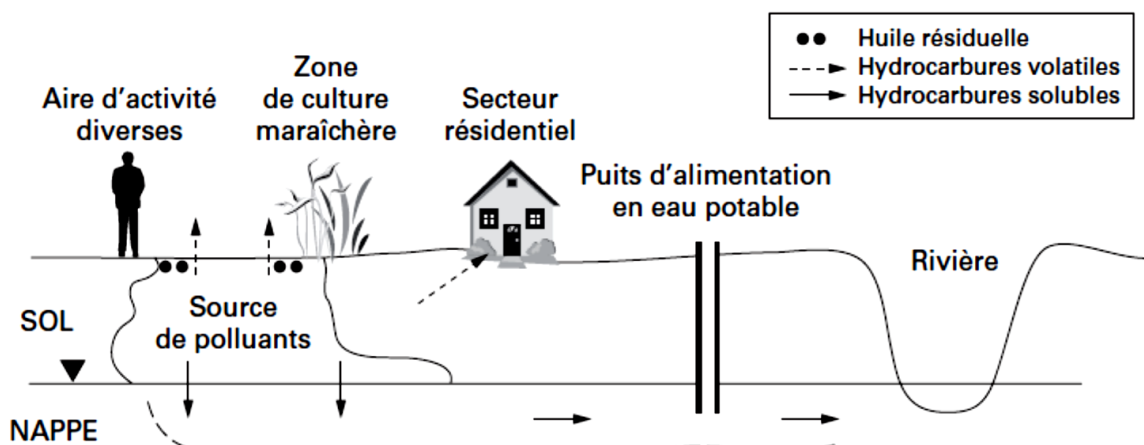


Figure 12 : Description schématique des cibles et des voies d'exposition aux hydrocarbures dans les sols et sous-sol.

II.2.3. Pollution des mers et des océans par les hydrocarbures

Le pétrole étant la principale source d'énergie des pays industrialisés, il est donc sujet à un commerce mondial très important qui s'effectue pratiquement à 95% par voie maritime grâce à près de 50.000 navires de toutes sortes : pétroliers, porte-conteneurs, vraquiers, cargos polyvalents, navires spécialisés (transport de colis lourds, de voitures, porte barges), sans parler des car-ferries et des navires de croisière. Les risques liés au transport et à l'exploitation pétroliers maritime peuvent induire à :

- des pollutions accidentelles massives (les marées noires) :
 - les conditions maritimes (chavirage, accident d'équipage) ;
 - la collision ou l'échouement ;
 - les fissures de coque ou les déformations des citernes ;
 - le feu ou l'explosion d'une plate-forme pétrolières off-shore...etc
- des pollutions opérationnelles fréquentes :
 - les déballastages ou dégazages des bateaux pétroliers ;
 - les opérations de chargement ou de déchargement ;

En effet, chaque année, les rejets occasionnels liés au transport maritime représentent une contamination d'environ 65 tonnes dans l'océan mondial.

Les origines de leur présence dans les eaux sont multiples. On évaluait à près de 3,8 millions de tonnes la quantité d'hydrocarbures répandue annuellement dans les mers et les océans. La part des navires d'hydrocarbures a été estimée à près de 1,4 millions de tonnes, soit 37%.

Désormais, encore 3 millions de tonnes d'hydrocarbures qui se répandent annuellement en mer dont seulement 300.000 tonnes (10% du total) causés par les navires. Le reste, (90% de ces hydrocarbures) que l'on retrouve en mer, a trois origines différentes :

- la pollution tellurique (industrielle et domestique) qui représente environ 70%,
- la pollution des activités d'extraction du pétrole off-shore qui représente environ 10%,
- la pollution naturelle provenant de certaines fissures dans les fonds marins, sortes de sources sous-marines d'hydrocarbures qui représente également environ 10% des apports annuels d'hydrocarbures dans les mers et les océans.

II.2.3.1 Les marées noires

Une marée noire est une catastrophe industrielle et écologique dû à l'échouement d'une nappe d'hydrocarbures en zone côtière. Cette nappe est due à un déversement généralement accidentel dans le milieu marin du contenu d'un pétrolier ou d'une installation de production suite à un accident. Cette nappe est acheminée vers la côte par l'effet des marées, des vents et des courants.



Figure 13 : Les marées noires.

II.2.3.2. Origines des marées noires :

- Il faut savoir que des suintements naturels de pétrole existent. Ce phénomène est observable autour de diverses zones de mer côtières au niveau des bassins sédimentaires érodés ou de faille entre blocs de la couche terrestre.
- On peut trouver cela sur les côtes de l'Alaska, de la mer Rouge, de la Californie ou encore du Golfe de Mexique.
- A l'intérieur de ces terres, on peut trouver des affleurements de sables bitumeux à partir desquels des hydrocarbures sont entraînés dans le réseau fluvial.

- Selon une étude réalisée, l'eau évacuée par une plateforme pétrolière lors du raffinage du pétrole provoquerait un éclat huileux persistant pendant environ 210 jours.
- le dégazage désigne la ventilation et l'évacuation des gaz produits par les hydrocarbures dans les citernes d'un navire : ces gaz nocifs doivent être éliminés pour permettre aux hommes de pénétrer dans les citernes ;
- le déballastage désigne quant à lui le déchargement des eaux de lestage du navire, des résidus de cargaison liquide et des résidus de fonctionnement.

II.2.3.3. Conséquences des marées noires

- Ces marées noires perturbent durement et durablement la faune et la flore des zones côtières. Elles génèrent de graves dégradations au niveau biotique et de l'écosystème ce qui causera l'asphyxie totale du milieu.

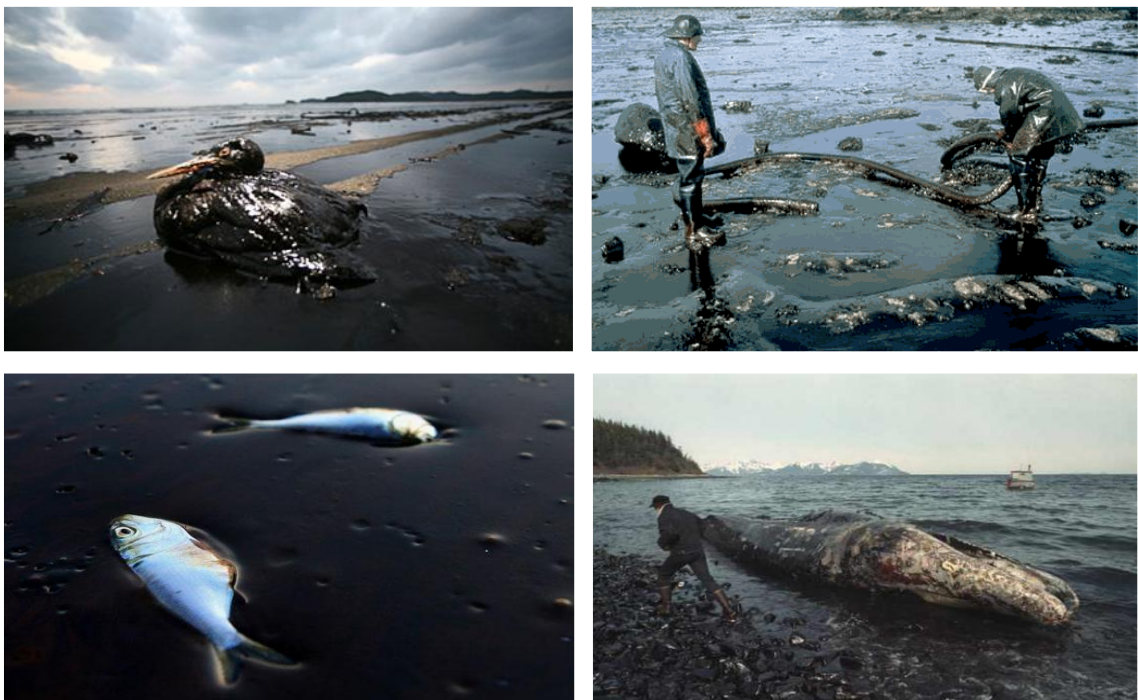


Figure 14 : Conséquences des marées noires.

- Le pétrole a des effets sur la fibrinolyse, le système immunitaire, la fertilité, la résorption osseuse, le métabolisme des acides gras et aussi l'augmentation du stress oxydatif, ainsi que des troubles de la mobilité cellulaire et une augmentation du taux de protéines associées à l'apoptose.

- La vie végétale et animale dans la mer et sur les rives est en partie détruite par les marées noires. Ainsi, le soleil ne peut plus éclairer les fonds marins, l'air ne passe plus à cause de ces marées noires, par conséquent, les végétaux ainsi que les animaux formant le plancton disparaissent et la chaîne alimentaire est détruite.
- Une fraction des éléments composant le pétrole sera bioaccumulé par les animaux filtreurs et ces produits vont sérieusement contaminer le réseau trophique. Certains animaux vont absorber les composants du pétrole, contaminant la chaîne alimentaire et des produits de la pêche qui deviennent impropres à la consommation.
- Produits dangereux par inhalation et par contact avec la peau. Un risque accru de développer un cancer de la peau, du scrotum après exposition à la suie, au goudron, aux huiles minérales.
- Le nettoyage des rivages est très coûteux. Il faut aussi savoir que le nettoyage des côtes peut détériorer le milieu.
- Plusieurs milieux naturels sont touchés par les marées noires. Les milieux tels que les marais, les vasières, les mangroves ou encore les récifs coralliens sont très sensibles aux déchets pétroliers. Dans ces milieux, la toxicité des rejets étouffe et tue la végétation. Des crustacés sont accueillis par ces végétations et suite à l'extinction de leurs milieux, ils ne parviennent pas à survivre. De plus, le pétrole peut polluer les eaux souterraines car il existe des roches qui permettent l'infiltration de ce dernier.
- La quantité de pétrole déversé, la nature de celui-ci ainsi que le lieu où il se déverse sont les différents facteurs de l'impact d'une marée noire. Le produit pétrolier va s'évaporer beaucoup plus facilement s'il est léger donc le milieu marin sera moins touché. Certes si le pétrole présent dans l'eau, la quantité va diminuer mais on aura de la pollution atmosphérique. Les vents, les courants ainsi que l'aspect de la côte influence la dispersion de la nappe du pétrole.
- Les hydrocarbures composant le pétrole sont en majorité insolubles dans l'eau. Quand le pétrole est déversé dans l'eau, il s'étale à la surface. Il forme un film huileux d'un à une dixième de millimètre d'épaisseur. Sachant qu'il y a une soumission de cette nappe aux courants et aux vents, elle se divise en

gouttelettes qu'elles-mêmes sont progressivement dégradées par plusieurs processus physiques et chimiques : on a l'évaporation, l'émulsifiassions, la dissolution, l'oxydation et la sédimentation. Après la division du produit, c'est au tour de la biodégradation de commencer : des microorganismes tels que les algues ou encore les bactéries dégradent le pétrole. Ces microorganismes utilisent le carbone présent dans les hydrocarbures pour se développer.

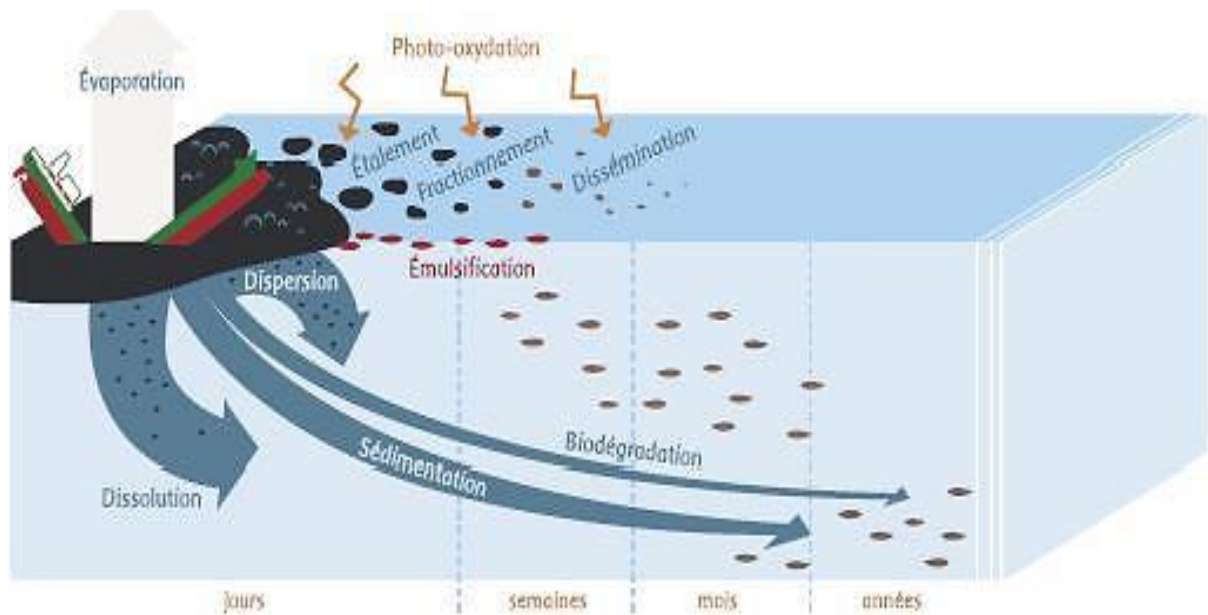


Figure 15 : Devenir du pétrole dans l'eau.

Chapitre III : Traitements des eaux usées en général

Ce chapitre est axé sur les traitements des eaux usées en général.

L'homme par ses nombreuses et diverses utilisations de l'eau, intervient négativement dans le cycle hydraulique en affectant la qualité des eaux de surfaces et des eaux souterraines. Et pour une meilleure utilisation de ces eaux afin de les recycler, des traitements sont proposés selon les besoins auxquels est destinée l'eau traitée.

Du réseau d'assainissement au rejet au milieu naturel, diverses étapes de traitements sont proposées pour la dépollution des eaux usées dans la station d'épuration :

III.1. Prétraitement ou traitement primaire :

Avant leur traitement, les eaux brutes doivent subir un traitement qui a pour objectif d'extraire la plupart des matières pouvant gêner les traitements ultérieurs.

De nature physique, les opérations de prétraitements sont :

III.1.1. Dégrillage

Ce procédé a pour but d'éliminer les matières volumineuses des eaux, afin d'éviter les risques de colmatage. Il est donc indispensable en tête de station d'épuration, en faisant passer l'effluent d'entrée à travers des barreaux dont l'espacement est déterminé en fonction de la nature de l'effluent.

III.1.2. Dilacération

Il s'agit d'une opération de broyage des déchets qui sont évacués avec l'eau brute et de les transformer en particules plus fines qui sont envoyés vers les décanteurs.

III.1.3. Tamisage

C'est un dégrillage fin puisque les eaux doivent traverser des mailles étroites. Ils sont utilisés lorsqu'on cherche à retenir les matières en suspension de petites tailles.

III.1.4. Dessablage

Son rôle est d'éliminer le sable et les matériaux lourds, en vue d'éviter l'abrasion des corps des pompes et des équipements mécaniques, le colmatage des tuyauteries et leur accumulation dans les réservoirs à boues et les digesteurs.

III.1.5. Dégraissage - Déshuilage

C'est une opération destinée à réduire les graisses et les huiles non émulsionnées par simple flottation physique en surface.

III.1.6. Décantation

La décantation réalisée par sédimentation, a pour but d'éliminer les particules en suspension dont la densité est supérieure à celle de l'eau.

On distingue quatre types de décantation :

- Décantation de particules discrètes

Elle est caractérisée par le fait que les particules conservent leurs propriétés physiques initiales (forme, dimension et densité) au cours de leur chute avec une vitesse de sédimentation constante.

- Décantation de particules flocculantes

Ce type est caractérisé par l'agglomération des particules au cours de leur chute. Les propriétés physiques de ces particules sont donc modifiées pendant le processus.

- Décantation freinée

Elle est caractérisée par une concentration élevée de particules, ce qui entraîne la formation d'une couche et par conséquent, l'apparition d'une démarcation nette entre les solides décantés et le liquide surnageant.

- Décantation en compression de boue

Dans ce type de décantation, les particules entrent en contact les unes avec autres et reposent sur les couches inférieures. Dans cette zone, le phénomène de solidification est relativement lent.

III.2. Traitement secondaire :

Deux types de traitements peuvent être distingués dans les traitements secondaires : les traitements physico-chimiques et les traitements biologiques.

III.2.1. Traitement physico-chimique

C'est une opération qui consiste à éliminer les matières polluantes qui ne peuvent pas être traitées par les procédés biologiques conventionnels. Elle vise, particulièrement, à éliminer des eaux usées les matières en suspension, des nutriments (azote, phosphore), et surtout les métaux lourds et les sels inorganiques.

- Coagulation – Flocculation :

La coagulation implique d'une part, la réduction des charges électriques superficielles, et d'autres parts, la formation d'hydroxydes complexes sous forme de flocons.

Cette technique est appliquée, par exemple, pour l'élimination de la turbidité ou de la coloration des eaux usées et la précipitation pour l'élimination des phosphates.

Les réactifs de coagulation les plus utilisés de nos jours sont les sulfates d'aluminium, la chaux et les sels ferriques.

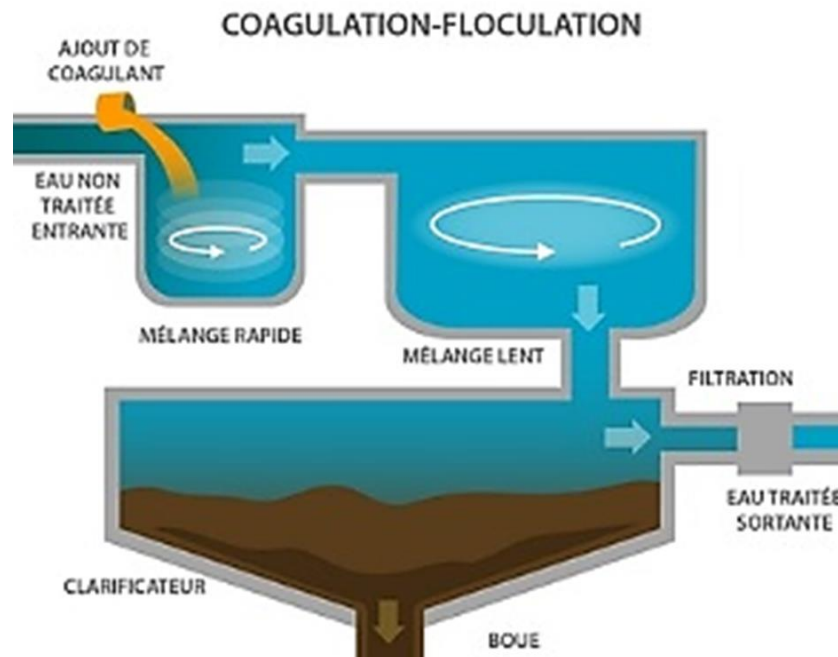


Figure 16 : Schéma du procédé physico-chimique d'épuration.

- Précipitation chimique :

Elle est utilisée pour l'élimination des métaux lourds. La dureté d'une eau est due à la présence d'ions métalliques bivalents Ca^{2+} , Mg^{2+} , Mn^{2+} ,etc.

III.2.2. Traitement biologique

Ce type de traitement est basé sur l'activité vitale de microorganismes qui utilisent les impuretés organiques dissoutes ou amenées à une forme soluble, et ce en partie comme source d'énergie et en d'autre partie pour la synthèse de substances cellulaires nouvelles, ce qui a pour résultat de les éliminer du liquide.

La dégradation biologique s'accomplit en deux phases qui s'effectuent simultanément :

- Une phase d'absorption, très rapide, au cours de laquelle les substances organiques s'absorbent sur la membrane externe des cellules,
- Une phase d'oxydation, plus lente, au cours de laquelle, a lieu l'oxydation des matières organiques en produits de décomposition tels que le CO_2 et H_2O .

Plusieurs procédés sont proposés, parmi lesquels :

- Traitement par boue activée :

Le procédé à boue activée consiste à déverser l'effluent d'eau dans un bassin où une culture microbienne est maintenue en suspension grâce à un dispositif qui assure l'homogénéité du mélange et l'aération du liquide.

Les microorganismes se développent aux dépens des matières oxydables de l'effluent et forment de multiples floccs qui constituent la boue activée. Celle-ci se sépare du liquide épuré par simple décantation, ce qui permet le rejet de l'eau traitée et la réinjection de la masse active dans le bassin d'aération.

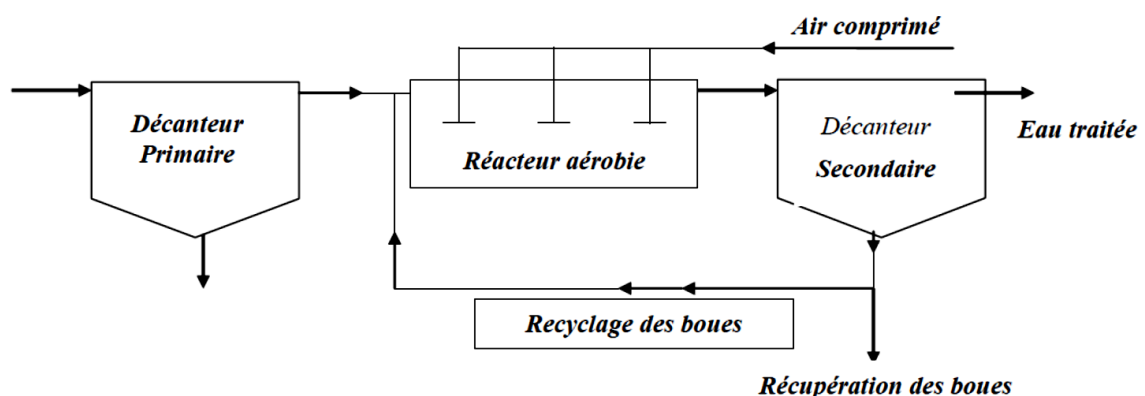


Figure 17 : Schéma du procédé d'épuration biologique à boue activée.

- Traitement par lits bactériens

Le lit bactérien est constitué d'une couche de matériau de cailloux ou de pouzzolane... etc, de diamètre variant entre 5 et 8 cm. Cette couche atteint plusieurs mètres de diamètre et entre 1,5 et 4m de hauteur, recouverte d'un biofilm, appelée « zoogléa », fixé au matériau et composé de bactéries, de champignons et d'algues en surface. L'eau ruisselle sur le lit et une aération naturelle, dans la majorité des cas, est assurée par ventilation.

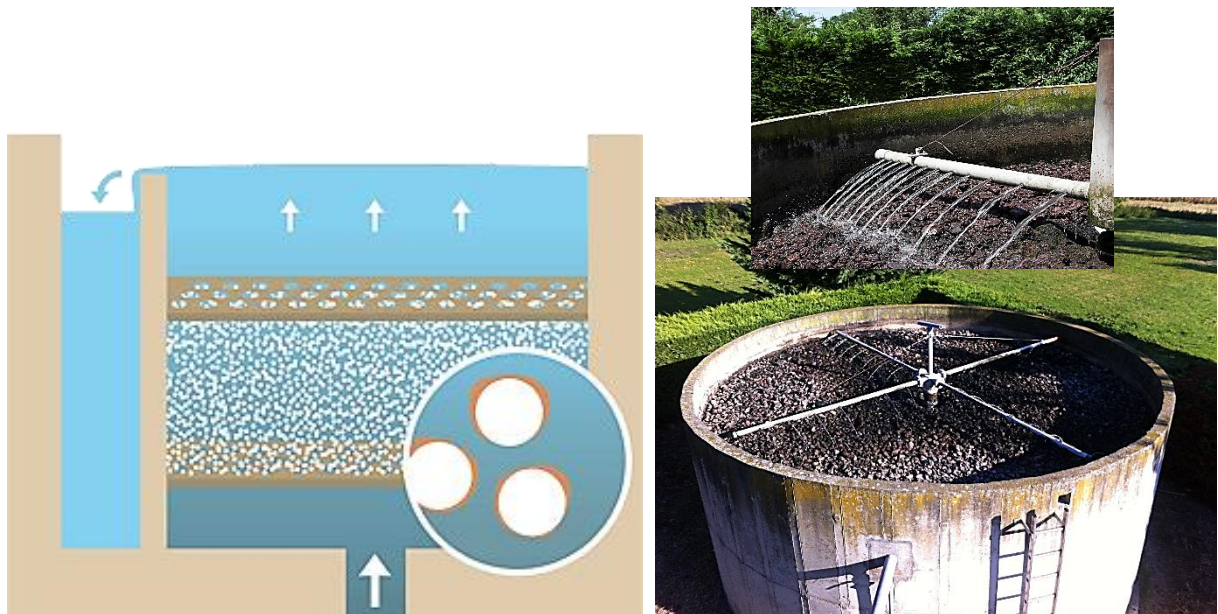


Figure 18 : Schéma du procédé d'épuration biologique à lits bactériens.

- **Traitement par disques biologiques**

Ce procédé peut être rangé parmi les systèmes d'épuration biologique aérobie où la culture bactérienne est fixée sur un support comme c'est le cas pour les lits bactériens. Il est également appelé procédé d'épuration par biodisques.

Ce réacteur est constitué d'une série de disques en matière plastique de 3m de diamètre environ, et montés sur un axe horizontal. Ces disques sont immergés à 40% approximativement dans un bassin recevant l'eau à traiter. Les disques sont suffisamment espacés de manière à ce que l'eau puisse circuler librement.

L'efficacité du procédé dépend essentiellement de la vitesse de rotation des disques, du temps de séjour et de la température.



Figure 19 : Procédé d'épuration biologique par les disques biologiques.

- Traitement par Lagunage

C'est une autre forme de traitement biologique par utilisation des étangs de grandes surfaces de terrains. Il existe trois types de lagunages : aérobies, anaérobies et facultatifs.

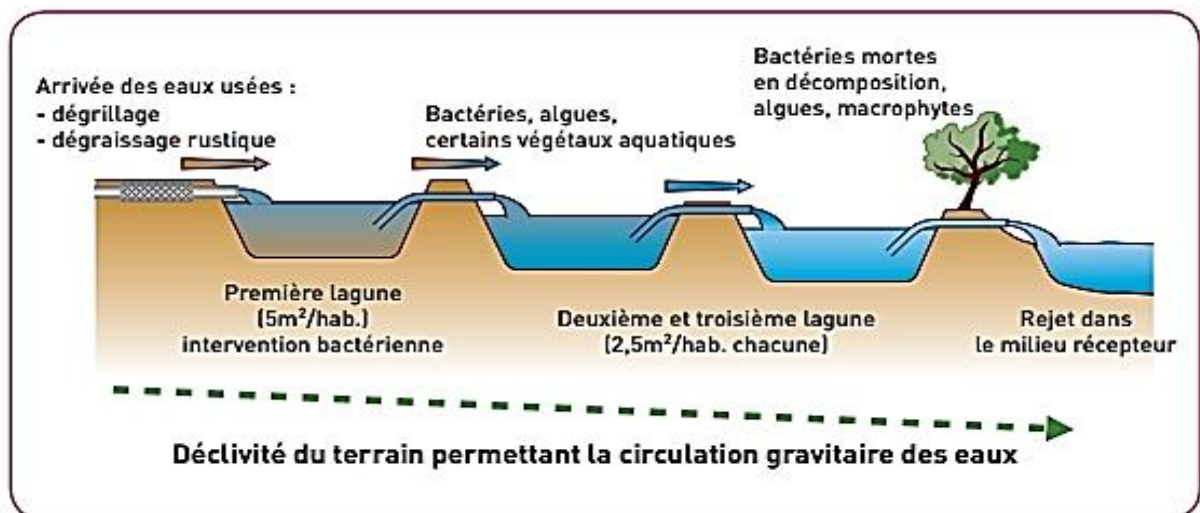


Figure 20 : Procédé d'épuration par lagunage.

III.2.3. Traitements tertiaires

Les traitements tertiaires regroupent toutes les opérations physiques, chimiques ou biologiques qui complètent les traitements primaires et secondaires. Parmi les plus courants, on peut citer :

- Filtration

Elle est utilisée pour l'élimination des matières en suspension, en tant que traitement de finition en aval d'un procédé physico-chimique ou biologique.

L'efficacité du procédé de filtration est fonction essentiellement de :

- la concentration et la nature des matières en suspension,
- la nature du matériau filtrant et de tout autre adjuvant de filtration,

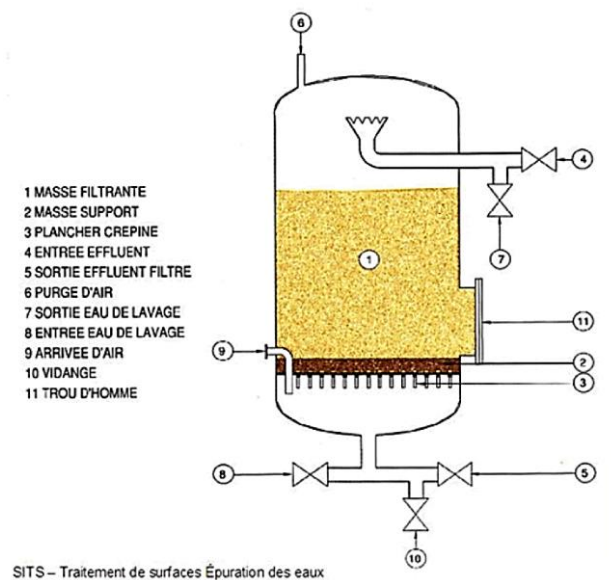


Figure 21 : Filtration sur un lit de sable.

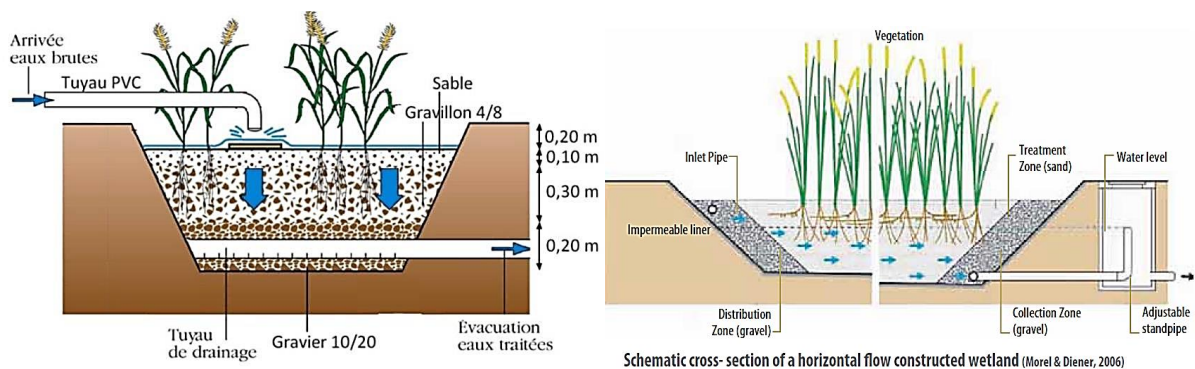


Figure 22 : La phyto-épuration.

- Adsorption

Les procédés d'adsorption sont utilisés pour l'élimination des matières organiques réfractaires dans les traitements tertiaires ou pour l'élimination des matières organiques biodégradables ou non, dans les chaînes de traitements physico-chimiques. Parmi les différentes sortes d'adsorbants, le charbon actif est le plus usité.

Le charbon actif élimine les impuretés de l'eau en les fixant et en les accumulant à sa surface, c'est pourquoi une grande surface par unité de volume et une forme poreuse constituent les caractéristiques essentielles d'un bon adsorbant.

Le charbon activé est particulièrement efficace pour l'élimination des polluants organiques dissous, comme les détergents, les colorants solubles, les solvants chlorés, les phénols...

Deux techniques de mise en œuvre sont utilisées : le charbon en poudre ajouté et le charbon en lit filtrant.

- Echange d'ions

La technique repose sur l'échange d'ions qui peut s'effectuer entre les ions en solution, et ceux liés à certaines fonctions chimiques que contient l'échangeur. Cette technique est utilisée pour l'élimination ou le remplacement de certains ions contenus dans l'eau, tels que les ions calcium, magnésium, zinc, chrome, ..., etc.

La plupart des échangeurs utilisés actuellement sont des résines soit cationique ou anionique.

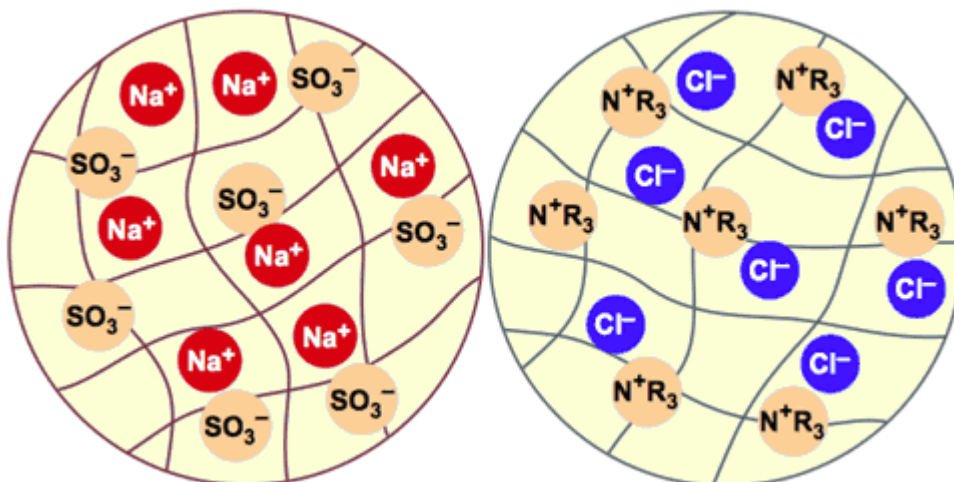


Figure 23 : Représentation schématique de billes de résines échangeuses de cations et d'anions.

- Séparation par membrane

Les procédés par membrane sont basés sur le principe de la séparation en phase liquide par perméation à travers des membranes semi-perméables. On distingue :

- Osmose inverse : C'est un système comportant une membrane semi-perméable a la propriété de laisser passer l'eau pure (solvant) et non les corps en solution (ions).
- Ultra filtration : Ce procédé recouvre les domaines des molécules moyennes (poids moléculaire supérieur à 500mm environ), des macromolécules et des colloïdes. Au-dessus de 0,5µm environ on entre dans le domaine de la filtration traditionnelle.
- Electrodialyse : Elle consiste en l'élimination des ions minéraux par application d'un champ électrique qui entraîne la migration des cations et des anions respectivement vers la cathode et l'anode. En disposant alternativement des membranes perméables aux anions et aux cations, on crée une série de compartiment à faible et forte concentration en sels.

- Désinfection

C'est un traitement qui permet de détruire et d'éliminer les microorganismes susceptibles de transmettre des maladies. Ce traitement n'inclut pas nécessairement la stérilisation qui est la destruction de tous les organismes vivants dans un milieu donné.

Les produits chimiques les plus utilisés sont : le chlore, le dioxyde de chlore, l'hypochlorite de sodium, l'ozone et le permanganate de potassium.

On peut également désinfecter l'eau grâce à des moyens physiques : ébullition, ultraviolet ou rayons gamma.

Chapitre IV : Traitement de la pollution par les hydrocarbures

Ce chapitre est consacré au traitement de la pollution par les hydrocarbures, et les différentes interventions techniques.

VI.1. Lutte contre les marées noires

Les marées noires font parties des spectacles écologiques les plus tragiques du monde actuel. Les images fréquentes de plages polluées mettent en évidence la difficulté pour lutter contre ces catastrophes. Mais quelles solutions possédons-nous pour éviter qu'une marée qu'elle épargne l'écosystème ?

- Pour combattre une marée noire, il faut d'abord déterminer de quel type de pétrole il s'agit et la manière dont il réagit au contact de l'eau de mer.
- On choisit ensuite parmi les trois principales techniques existantes :
 - l'aspiration,
 - la combustion ou,
 - le traitement par produits chimiques.

Commençons par rappeler que le pétrole n'est pas miscible dans l'eau et qu'il est moins dense. Ces deux propriétés font que le pétrole forme des nappes surnageantes à la surface de l'eau.

Ainsi, il est possible de confiner les nappes à l'aide de barrage ou de les récupérer directement depuis un bateau. Cette technique reste limitée pour plusieurs raisons :

- Principalement c'est l'évaporation des composés les plus légers du pétrole qui pose problème. En effet, cette évaporation entraîne une augmentation de la densité du pétrole jusqu'à que les nappes finissent par s'enfoncer sous la surface de l'eau.

- Lors de grosses marées noires, il est difficile de récupérer toutes les nappes avant que ce phénomène intervienne surtout dans le cas de forte agitation du milieu.



Figure 24 : Confinement et récupération d'une nappe d'hydrocarbures.

Une deuxième solution consiste à brûler les nappes de pétrole. Cette méthode est rarement employable car :

- Les nappes sont souvent trop pauvres en composés inflammables.
- De plus, la combustion du pétrole brut engendre des fumées extrêmement nocives pour le vivant. Cette solution n'est donc employée que dans des zones éloignées des populations.



Figure 25 : Combustion du pétrole brut, et accident d'une exploitation offshore.

Finalement la solution la plus employée est celle de la dispersion. Cette méthode consiste à déposer des tensio-actifs sur les nappes de pétrole. Les tensio-actifs sont des molécules qui possèdent à la fois une affinité pour l'eau et pour le

pétrole. Lors de leur dépôt sur une nappe, les tensio-actifs se placent de manière privilégiée à l'interface entre le pétrole et l'eau.

- Cette présence abaisse l'énergie nécessaire pour créer une interface eau/pétrole.
- Les tensio-actifs, aidés de l'agitation de la surface de la mer par le vent, favorisent donc la dispersion des nappes en fine gouttelettes.

L'utilisation de tensio-actifs peut surprendre car elle n'élimine pas le pétrole de la mer. La présence de pétrole, même sous forme des fines gouttelettes, reste nocive pour la faune et la flore marine.

- Cependant la dispersion permet aux courants marins de diluer plus rapidement le pétrole et donc d'amoindrir sa toxicité.
- De plus, la dispersion évite le dépôt des nappes sur le rivage.
- Enfin, elle permet d'augmenter la surface d'échange entre les gouttes de pétrole et l'eau, ce qui accélère la dégradation du pétrole par le milieu naturel.

VI.2. Traitements des sols et sous-sols

Les techniques de traitement des sols pollués sont classées en trois grandes catégories :

- Procédés physicochimiques,
- Biologiques et,
- Thermiques.

Le choix des techniques est guidé par :

- Un compromis technico-économique, qui se traduit également par le temps et le coût de traitement, le délai de décontamination et la taille du chantier,
- le type et la nature de la pollution et du sol lui-même,
- les risques pour les opérateurs.

On distingue deux modes de mise en œuvre :

- Techniques ex situ et,
- Techniques in situ.

VI.2.1. Technique de traitement in situ

Les techniques in situ sont directement effectuées dans le sol ou l'eau souterraine, en général dans les 10 premiers mètres, par des procédés qui permettent de traiter les polluants sans excavation. Ce traitement présente deux avantages majeurs par rapport aux méthodes sur site :

- Elle traite en même temps le sous-sol et l'eau de la nappe ;
- Son coût est moins élevé.
- Ce traitement est intéressant lorsqu'on doit par exemple dépolluer sous les bâtiments ou encore lorsque la contamination est présente en profondeur.
- Elle traite aussi les produits qui s'infiltrent par gravité dans le sol jusqu'à la surface de la nappe phréatique.

La Bio-traitabilité d'un site

L'étude de traitabilité d'un site représente une étape préalable obligatoire dont les résultats vont aider à la prise de décision sur la réalisation d'un traitement et sur le choix de la technique la mieux adaptée à la résolution du problème posé.

Plusieurs types d'analyses devront être effectués sur des échantillons de sols prélevés à plusieurs endroits et profondeurs du terrain pollué :

- Des analyses chimiques (nature, teneur, présence de contaminants minoritaires qui pourraient inhiber des phénomènes microbiologiques) afin de préciser les limites du processus biologique ;
- Des analyses physiques afin de bien connaître les caractéristiques du sol et d'évaluer leurs influences sur l'activité des micro-organismes ;
- Des analyses microbiologiques : permettant de vérifier la présence et la capacité des microorganismes du sol à dégrader les polluants en place.

Procédés appliqués

La décontamination par voie biologique va consister à stimuler ce phénomène naturel pour en augmenter le rendement, afin de détruire, en un minimum de temps, le polluant organique, utilisé comme source de carbone. Le bio-traitement est une réelle méthode de dépollution, et non un simple transfert de polluants d'un milieu à un autre, puisque les molécules sont décomposées et donc détruites au cours du processus.

Ce traitement consiste à injecter de l'air, des bactéries (si c'est nécessaire) et des nutriments (N et P) pour décomposer biologiquement ou physiquement les polluants.

Cette décontamination peut être mise en application de deux façons,

- soit directement in situ en introduisant dans le sous-sol les additifs nécessaires au développement de la biomasse,
- soit en traitant sur le site, l'eau pompée ou le sol excavé dans des unités spécialement équipées.

Les groupes de composés polluants, qui constituent de « bonnes cibles » pour la bio décontamination comprennent :

- Les hydrocarbures pétroliers tel que le gasoil, le fuel, l'essence, le kérozène, l'huile minérale...y compris le groupe du benzène,
- Les déchets de l'exploitation du pétrole, boues et résidus d'huiles ;
- Les produits et résidus organiques de l'industrie chimique de base, avec par exemple les alcools, les acétones, les phénols, les aldéhydes et autres solvants ;
- Les composés organiques halogénés, incluant des solvants aliphatiques (trichloréthylène, chloroforme...) et aromatiques (chlorobenzène...) mais aussi les polychlorobiphényles (PCB), aussi appelés biphényles polychlorés (BPC) ;
- Les composés plus complexes de types aromatiques polycycliques (HAP), pesticides ;
- Les nitrates et les sulfates.

Deux schémas d'utilisation peuvent être mis en place :

- Si la contamination se situe dans la zone non saturée, la solution qui contient les nutriments et l'oxygène est infiltrée dans le sol depuis la surface provoquant au passage le développement de la biomasse et la dégradation de la pollution ;
- Si la contamination se situe au niveau de la nappe ou au sein de celle-ci :
 - La solution injectée dans la nappe (au sommet de la nappe si le polluant est flottant), en amont de la zone à traiter ; elle est alors emportée vers l'aval par l'écoulement de la nappe et traverse la zone contaminée qu'elle traite, c'est un système passif ;

- la solution est injectée en amont comme dans le cas précédent mais en plus, à l'aval de la zone, l'eau est pompée et recyclée pour être réintroduite dans le circuit, système actif.

Dans la majorité des cas, c'est la flore autochtone qui est la seule mise à contribution. Parfois, il peut être nécessaire pour activer le démarrage du processus, de provoquer leur développement en laboratoire à partir d'échantillon prélevés et de les ré-inoculer ensuite dans le milieu, ou encore d'inoculer des souches allochtones, en sachant que leur adaptation aux conditions in situ sera à priori peu aisée.

La conception même du dispositif fait souvent appel à la modélisation par ordinateur, notamment pour stimuler les conditions d'injection, d'écoulement et de pompage des solutions. L'utilisation de ces modèles permet de prendre en compte (et éventuellement de faire varier) les paramètres de base assurant l'efficacité du système. C'est particulièrement important pour déterminer le nombre de puits nécessaires, leur profondeur, leur emplacement et ainsi concevoir un dispositif opérationnel sur toute la zone à traiter.

Le bioventing et le biosparging Ces deux techniques de traitement in situ allient deux principes de décontamination, la biodégradation et la ventilation.

Lorsqu'on parle de bioventing, on réalise une aération forcée dans le sol non saturé (au-dessus du niveau de la nappe phréatique) ; lorsqu'on emploie le terme de biosparging, l'air est injecté directement dans la nappe phréatique.

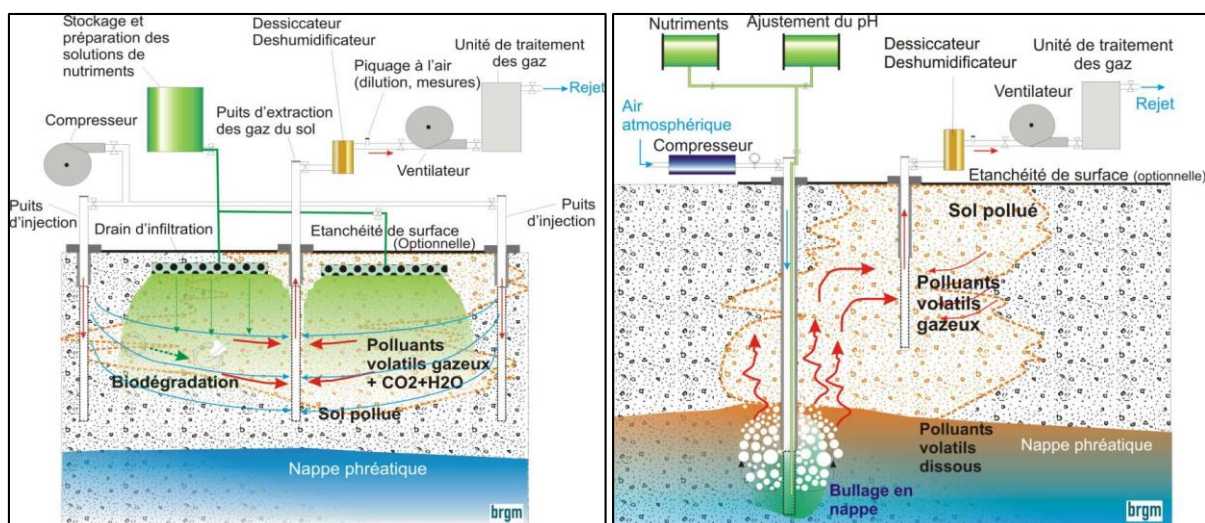


Figure 26 : Bioventing et le Biosparging.

D'autres techniques comme l'oxydation chimique consistent à injecter un oxydant sous forme liquide ou gazeuse qui entrera directement en contact avec le polluant pour aboutir à sa destruction ou à sa transformation en un composé moins toxique.

La pollution peut également être confinée pour éviter sa migration. Le confinement est souvent utilisé pour un traitement combiné du sol et de la nappe phréatique.

Facteurs influençant la biodégradation

- Les principaux paramètres de ce traitement sont en conséquence ceux qui influencent les conditions de vie des microorganismes : le taux d'oxygène, la quantité de nutriments (N et P) disponibles, l'humidité, la température, le pH, et les paramètres physico-chimiques des produits à traiter.
- Il faut prendre en compte que la biodégradabilité d'un polluant dépend non seulement du produit à dégrader lui-même mais aussi des produits environnementaux et des conditions thermiques.
- Les vitesses de dégradation des composés organiques dépendent de leur structure chimique. Plus une molécule est substituée, plus elle est difficile à dégrader. La position des substituants joue également un rôle puisque les positions ortho et méta augmente la résistance des molécules, ainsi que les substitutions sur le carbone alpha, comparativement à celle en oméga.
- La présence de pesticides ou de métaux lourds, toxiques pour la biomasse, va inhiber la biodégradation des composés organiques même facilement biodégradable comme les hydrocarbures.
- Certains produits, réputés non biodégradables sous certaines conditions, par exemple en aérobic avec tel type de flore bactérienne, pourront le devenir dans d'autres conditions, comme anaérobic. C'est le cas pour de nombreux solvants chlorés, qui ne peuvent être dégradés directement en aérobic, mais nécessitent une première opération de déchloration (partielle) de la molécule en l'absence d'oxygène. Une fois la déchloration faite, les chaînes carbonées peuvent être détruites à leur tour sous des conditions oxydantes classiques.
- Une trop forte concentration du polluant pourra entraîner une inaccessibilité du polluant aux microorganismes qui resteront en périphérie de la masse polluante sans y avoir accès.

- Le second facteur à prendre en compte est le type de microorganismes (bactéries, champignons, algues...). Dans la majorité des cas on utilisera des souches bactériennes et chaque souche sera utilisée pour un polluant particulier. Par exemple, pour les hydrocarbures pétroliers on prendra des arthrobacters, Pseudomonas, alors que pour la biolixiviation des métaux lourds on prendra des souches de Thiobacilus.

VI.2.2. Technique de traitement ex situ

Ce type de traitement est envisageable lorsque les terres polluées sont facilement accessibles et leurs volumes tels que leur excavation et leur transport ne génèrent pas des coûts trop élevés.

Certaines peuvent être mises en œuvre sur le site même via des installations temporaires. Cela permet de pouvoir réutiliser les terres après dépollution. Les terres polluées sont mises de côté et subissent des traitements biologiques, physico-chimiques ou thermiques (désorption thermique).

Les terres polluées peuvent également être confinées, stabilisées ou lavées sur site. Cette dernière technique consiste à extraire les polluants à l'aide d'eau ou de solvants. Les polluants sont ainsi transférés dans l'eau ou le solvant qui sera ensuite traité.

Lorsque le terrain ne le permet pas, les terres excavées sont traitées hors du site, dans des centres de traitement fixes. Ces centres peuvent être des installations de lavages de terres, de désorption thermique, de stabilisation, de traitement biologique ou encore d'incinération et des cimenteries.

VI.1.2.1. Le traitement en bio réacteur

Le principe du bioréacteur consiste à réaliser la biodégradation du polluant dans un contenant installé sur le site (cuve fermée, bassin, colonne...etc), en ajoutant au matériel à traiter les ingrédients nécessaires à la réaction. Cette technique permet la dépollution :

- D'eau, pompée au préalable ;
- Du sol, qui sera traité sous forme de boue ;
- D'une phase gazeuse (on parle alors de bio filtre).

Cette technique présente plusieurs avantages :

- Un contrôle précis et facile du pH, de la température, de l'humidité, des teneurs en nutriments...etc ;
- Le mélange entre les nutriments et les microorganismes est facile et efficace de même que l'aération de l'ensemble ;
- Les conditions de biodégradation peuvent être rapidement atteintes et réajustées au besoin (bon rendement).

VI.1.2.2. La biodégradation en « tas »

Ce terme recouvre plusieurs méthodes de décontamination par voie biologique qui ne concernent que les matériaux solides, dans la plupart des cas il s'agira des sols contaminés par des produits organiques, on décrira successivement :

- Les méthodes de compostage,
- Le « land farming » et
- La technique dite du traitement en « biopile ».

Le principe de base de la biodégradation en tas consiste à excaver le sol et à le disposer à proximité, en respectant certaines modalités techniques visant à favoriser la biodégradation aérobie naturelle comme l'aération, le taux d'humidité et l'apport en nutriments ; La source de microorganismes provient habituellement de la flore bactérienne présente dans le sol mais on peut aussi ajouter des microorganismes.

a. Le compostage

C'est la technique la plus simple. Le sol excavé est disposé en andains régulièrement espacés de quelques mètres de circonférence et d'environ d'un mètre de haut. L'excavation et la mise en tas provoquent l'aération du matériau qui est laissé tel quel. Sous un climat tempéré humide, les conditions naturelles suffiront à l'humidification des andains. Dans ces conditions le processus de dégradation est lent et peu rentable. Pour accélérer le phénomène, il est d'usage de mélanger la terre à un substrat organique grossier qui favorisera l'aération au cours du temps et apportera un complément nutritif à la réaction ; on peut utiliser pour cela des matériaux tel que la paille, les débris d'écorces ou de broussailles, du fumier...



Figure 27 : Compostage d'un sol contaminé disposé en andains.

b. Le « land farming »

C'est une technique plus élaborée qui consiste à traiter le matériau comme un sol agricole pour en faciliter la décontamination.

Le sol pollué est tout d'abord étalé régulièrement sur de grandes surfaces planes, sur une épaisseur de quelques dizaines de centimètres, permettant par la suite le passage et le travail d'outils agricoles ; pour éliminer le risque de re-pollution du sol sous-jacent, cet étalement est réalisé généralement sur des surfaces imperméables ; dans les zones périurbaines ou industrielles, les aires de parking asphaltées conviennent parfaitement.

Un fertilisant est ensuite ajouté, soit sous forme d'engrais chimique, soit sous forme de fumier ; épandu sur toute la surface du matériau à traiter, il est ensuite enfui et mélangé au sol. Cet apport améliore l'équilibre nutriments/source de carbone et, dans le cas du fumier, augmente la quantité de microorganismes disponibles. A intervalles de temps réguliers, le sol est travaillé, retourné et biné, pour permettre son aération.

c. Le traitement en « bio pile »

Lorsqu'on a affaire à un sol pollué contenant une fraction de contaminants volatiles non négligeable, ou dans les pays où la législation interdit tout traitements de dépollution à l'air libre, le compostage et le land farming sont remplacés par des techniques de biodégradation en tas plus élaborées appelées bio piles. Cette

technique prévoit, comme pour les deux méthodes exposées précédemment, la mise en tas du sol pollué excavé. Pour satisfaire les contraintes techniques et ou législatives, le tas à traiter sera recouvert d'une membrane imperméable, et la gestion des entrées et des sorties des phases liquides et gazeuses devra être parfaitement maîtrisée.

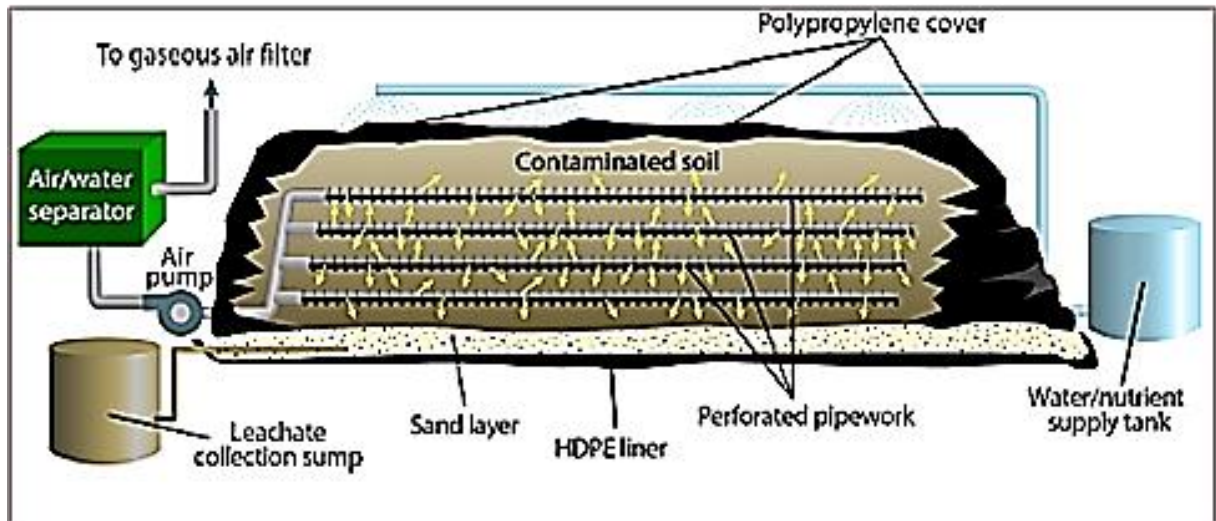


Figure 28 : Technique de traitement d'un sol pollué par Bio pile.

Exposés et travaux dirigés

1. Fracturation hydraulique,
2. Exploration et exploitation de pétrole onshore,
3. Exploration et exploitation de pétrole offshore,
4. Raffinage du pétrole et utilisation de ses dérivés,
5. Effet de serre : impacts et adaptation au changement climatique,
6. Traitement des eaux polluées par les hydrocarbures,
7. Le plan POLMER,
8. Les Pluies acides Et leurs impacts sur l'environnement,
9. Techniques de protection et de préservation des sols pollués.
10. Désinfection physico-chimique des eaux,
11. Un biocarburant vs un carburant fossile pour un environnement protégé,
12. Lutte contre la pollution marines par les hydrocarbures.

Références Bibliographiques

- Al-Azab, M., El-Shorbagy, W., & Al-Ghais, S. (2005). Oil Pollution and its Environmental Impact in the Arabian Gulf Region. *Developments in Earth and Environmental Sciences*. 1st Edition, 3, 256.
- Albakjaji, M. (2010). La pollution de la mer méditerranée par les hydrocarbures liée au trafic maritime. Thèse de Doctorat En Economies et Finances. Université Paris-Est, 299.
- Bahadori, A. (2014). Pollution control in oil, gas and chemical plants. Springer, 330. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-01234-6>
- Benchouk, A. (2017). Bioremédiation des sols pollués de pétrole par les micro-organismes indigènes et amélioration génétique de leur pouvoir de dégradation. Thèse de Doctorat En EMicrobiologie Appliquée. Université Abdelhamid Ibn Badis-Mostaganem, 199.
- Cadiere, F. (2006). Traitement biologique des sols pollués : recherche et innovation. Agence de l'Environnement et de La Maîtrise de l'Energie, 92. <http://www.ademe.fr>
- Cardot, C. (2001). Techniques appliquées au traitement de l'eau Hydraulique, électrotechnique, procédés de traitement - Génie de l'environnement. Ellipses, 248.
- Cardot, C. (2010). Les traitements de l'eau pour l'ingénieur Génie de l'environnement - Procédés physico-chimiques et biologiques - Cours et problèmes résolus. Ellipses. 2ème Edition, 302.
- Cardot, C., & Gilles, A. (2013). Analyse des eaux - Génie de l'environnement Réglementation, analyses volumétriques et spectrophotométriques, statistiques - Cours et exercices corrigés. Ellipses, 288.
- Carpenter, A. (1981). Oil pollution in the North Sea. *Environmental Policy and Law*, 7(41), 321. [https://doi.org/10.1016/S0378-777X\(81\)80045-5](https://doi.org/10.1016/S0378-777X(81)80045-5)
- Choubert, J.-M., Pomies, M., Miege, C., Coquery, M., Martin-Ruel, S., Budzinski, H., & Wisniewski, C. (2012). Élimination des Micropolluants par les Stations d'Épuration Domestiques. *Sciences Eaux & Territoires*, Numéro 9(4), 6. <https://doi.org/10.3917/set.009.0003>

- Cormack, D. (1999). Response to Marine Oil Pollution- Review and Assessment. Springer-Science+Business Media, B.Y, 2, 408.
- Denis, L. R. (2017). Recherche et production des hydrocarbures. *Géologie Des Mines et Pétrole*. <https://doi.org/10.1515/9783111654386>
- Européenne-Commission. (2003). Raffineries de pétrole et de gaz. Document de Référence Sur Les Meilleures Techniques Disponibles, 488.
- Kribii, R., Soustre, I., & Karst, F. (1999). Biosynthèse des isoprénoïdes. *Acta Botanica Gallica*, 146(1), 5–24. <https://doi.org/10.1080/12538078.1999.10515797>
- Michel, B. (2008). Modélisation de la production d ' hydrocarbures dans un bassin pétrolier To cite this version : HAL Id : tel-00345753. Thèse de Doctorat En Mathématiques. Université Paris Sud, 214.
- Michel, P. (1983). Impact des hydrocarbures sur la flore et la faune marines. Institut Scientifique et Technique Des Pêches Maritimes, 227. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00443/55438/56957.pdf>
- Parker, H. D., & Pitt, G. D. (1987). Pollution control instrumentation. *Chemical and Engineering News*. 1st Edition, 49(7), 444. <https://doi.org/10.1021/cen-v049n007.p078>
- Talluto, D. (2014). Impacts du déversement d'hydrocarbures sur les populations d'oiseaux marins. *LBOE 2143 - Questions d'actualité En Biologie Marine*, 15.
- Vandermeulen, J. H., & Hrudey, S. E. (1987). *Oil in Freshwater: Chemistry, Biology, Countermeasure Technology*. Pergamon Press. 1st Edition, 507.
- Wardley-Smith, J. (1979). *The Prevention of Oil Pollution*. Graham and Trotman Limited. 1st Edition, 318. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-7347-6>

Site internet :

- <https://www.universalis.fr/encyclopedie/petrole-le-petrole-brut/1-origine-du-petrole/>
- <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/formation-du-petrole>
- <https://www.airparif.asso.fr/pollution/differents-polluants>
- https://wikirouge.net/Pollution_de_l%E2%80%99eau
- http://www.siam77.fr/station_epuration_03.html
- https://www.liberation.fr/terre/2010/04/29/maree-noire-la-floride-decrete-a-son-tour-l-etat-d-urgence_623399
- <https://www.actu-environnement.com/ae/dossiers/sols-pollues/techniques-depollution.php4>