

*Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Ibn-Khaldoun –Tialet-
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département des Sciences de la Terre et de l'Univers*



Polycopié de cours intitulé :

GÉOLOGIE APPLIQUÉE

« COURS ET TD »

Destiné aux étudiants de 2^{ème} année Licence STU

Préparé par

Dr. OTMANE Abdelkader



2022 - 2023

Avant - propos

Ce cours est structuré en cinq chapitres. L'on a préféré commencer par un chapitre introductif et descriptif de Géologie minière afin de comprendre la genèse des différents gisements métallifères

Le chapitre II : vise le domaine de la géologie pétrolière. Cette partie du cours met en évidence les étapes de formation d'un réservoir (Pétrole et gaz) et d'un gisement de charbon, ainsi que la stratégie d'exploration

Le chapitre III : aborde l'étude des eaux souterraines (aquifère et bassin hydrogéologique), montre les différents types de nappes, ainsi que le problème de contamination.

Le chapitre IV : présente la géotechnique ; définitions et domaines d'application ; Essais permettant de déterminer les paramètres : de nature des sols, de compactage et de comportement mécanique.

Le chapitre V : traite l'environnement par l'étude de réchauffement climatique à travers l'évolution temporelle de la concentration des gaz à effet de serre ; Prévision attendus au 21^{ème} siècle.

Donc dans ce cours de Géologie appliquée : L'étudiant sera en mesure de comprendre les différents domaines de Géologie à savoir : la géologie minière, la géologie pétrolière, l'hydrogéologie, la géotechnique et l'environnement.

Table des matières

Chapitre I : Géologie minière	
1. Généralité (Définition des termes scientifiques)	1
2. Notion de gisements	2
3. Classification des gisements métallifères	3
3.1. Gîtes reliés aux processus superficiels	3
3.1.1. Plaçers	3
3.1.2. Dépôts résiduels	3
3.1.3. Dépôts sédimentaires	4
3.2. Gîtes reliés aux processus de l'activité ignée	4
3.2.1. Gisement primaire lié aux roches magmatiques (Dépôt magmatique).....	5
3.2.2. Dépôts pegmatitiques.....	5
3.2.3. Gisement lié aux processus hydrothermaux	6
4. Exemples de gisements liés aux processus superficiels.....	8
4.1. Les gisements de type marin (Exemple fer oolithique)	8
4.2. Les gisements détritiques :	9
5. Les modes d'occurrence des gîtes métallifères	9
6. Critères d'exploitation d'un gisement	10
TD-1	11
Chapitre II : Géologie Pétrolière	
1. Généralité	12
2. Formation des hydrocarbures (Pétrole et gaz naturel).....	12
2.1. Accumulation de la matière organique	12
2.2. Dégradation biochimique et thermique de la matière organique.....	13
2.3. Migration roche-mère à roche-réservoir	15
2.4. Piège.....	16
3. Le charbon	17
4. Exploration des combustibles fossiles (hydrocarbures et charbons)	18
4.1. Limitation à l'obtention d'un champ de pétrole	18
4.2. Limitation à l'obtention d'un champ de charbon	18
4.3. Stratégies d'exploration	19
TD-2	20
Chapitre III : Hydrogéologie	
1. Cycle global de l'eau à la surface de la terre.....	22
2. Bassin hydrologique et hydrogéologique.....	23
2.1. Aquifère.....	23

3.	<i>Différents types d'eau dans une roche</i>	24
4.	<i>Notions de porosité</i>	25
5.	<i>La nappe phréatique et la nappe perchée</i>	26
6.	<i>Identification géologique et hydrogéologique d'un aquifère</i>	26
6.1.	<i>Identification des formations hydrogéologiques</i>	27
6.2.	<i>Identification hydrodynamique de l'aquifère</i>	28
6.2.1.	<i>Configuration de l'aquifère (types hydrodynamique)</i>	28
7.	<i>Caractéristiques physiques du réservoir</i>	30
7.1.	<i>Milieu poreux</i>	30
7.2.	<i>Milieu fissuré</i>	30
8.	<i>Approvisionnement en eau potable</i>	31
9.	<i>La contamination d'une nappe phréatique et mode d'enfouissement des polluants</i>	32
10.	<i>Les terrains karstiques</i>	34
11.	<i>L'hydrothermalisme</i>	35
TD-3	37

Chapitre IV : Géotechnique

1.	<i>Qu'est-ce que la géotechnique ?</i>	40
2.	<i>Domaines d'application</i>	40
3.	<i>Géotechnique routière</i>	41
3.1.	<i>Terrassement</i>	41
3.2.	<i>Compactage</i>	42
3.2.1.	<i>Facteurs d'influence du compactage</i>	42
3.2.2.	<i>Le compactage profond</i>	43
4.	<i>Essai permettant de déterminer les paramètres de nature des sols</i>	44
4.1.	<i>Analyse granulométrique par tamisage :</i>	44
4.1.1.	<i>But de l'essai :</i>	45
4.1.2.	<i>Principe de l'essai :</i>	45
4.1.3.	<i>Résultats et interprétations :</i>	46
5.	<i>L'essai de détermination des paramètres de compactage</i>	47
5.1.	<i>L'essai Proctor</i>	47
5.2.	<i>L'objectif de l'essai Proctor</i>	47
5.3.	<i>Principe de l'essai :</i>	47
6.	<i>Les essais de détermination des paramètres de comportement mécanique</i>	49
6.1.	<i>Essai Los Angeles (Résistance à la fragmentation des gravillons)</i>	49
6.2.	<i>Essai Micro-Deval (Résistance à l'usure des gravillons)</i>	50
TD-4	51

Chapitre V : Environnement

<i>1. Définition.....</i>	<i>57</i>
<i>2. Pollution de l'environnement.....</i>	<i>57</i>
<i>3. Le réchauffement climatique.....</i>	<i>58</i>
<i>3.1. Qu'est-ce qu'un gaz à effet de serre ?.....</i>	<i>59</i>
<i>3.2. Evolution de la concentration des gaz à effet de serre.....</i>	<i>59</i>
<i>3.2.1. La fumée noire.....</i>	<i>60</i>
<i>3.2.2. Les aérosols.....</i>	<i>61</i>
<i>3.2.3. Le dioxyde de soufre SO₂.....</i>	<i>61</i>
<i>3.3. Qu'est-ce que l'effet parasol ?.....</i>	<i>62</i>
<i>3.4. Variations du climat et de la composition de l'air en fonction du temps.....</i>	<i>62</i>
<i>3.5. Quelles sont les conséquences probables du réchauffement climatique ?.....</i>	<i>63</i>
<i>TD-5.....</i>	<i>65</i>
<i>Références bibliographiques.....</i>	<i>71</i>

Liste des figures

Chapitre I : Géologie minière

Figure I. 1. Formes cristallographiques pour certains minéraux.....	1
Figure I. 2. Formes des corps minéralogiques.	2
Figure I. 3. Classification des gisements selon le processus responsable de la minéralisation.....	3
Figure I. 4. Minéralisation liée par l'évolution du bassin sédimentaire.....	4
Figure I. 5. Gites liés aux processus de l'activité ignée.....	5
Figure I. 6. Processus de minéralisation des dépôts pegmatitiques.....	6
Figure I. 7. Minéralisation de type métasomatique à travers d'un fluide hydrothermal (Skarn).....	7
Figure I. 8. Dépôts liés aux fluides hydrothermaux.....	7
Figure I. 9. Les modes d'occurrence des gites métallifères.....	9

Chapitre II : Géologie pétrolière

Figure II 1. Sources de la matière organique.....	13
Figure II 2. Pourcentage d'hydrocarbure générés (pétrole et gaz) en fonction de l'enfouissement.....	14
Figure II 3. Processus de concentration des hydrocarbures.....	16
Figure II 4. Architecture des couches géologiques (Pièges).....	17
Figure II 5. Etapes de formation du charbon.....	18

Chapitre III : Hydrogéologie

Figure III 1. Cycle global de l'eau.....	22
Figure III 2. L'eau sur terre.....	23
Figure III 3. Bassin hydrologique et hydrogéologique, ainsi que les termes de bilan.....	24
Figure III 4. L'eau dans la roche.....	25
Figure III 5. Nappe phréatique perchée.....	26
Figure III 6. Structure hydrogéologique composée par plusieurs aquifères.....	27
Figure III 7. Formations hydrogéologiques perméables.....	27
Figure III 8. Aquifère à nappe libre.....	28
Figure III 9. Aquifère à nappe captive.....	29
Figure III 10. Aquifère à porosité de fissures.....	30
Figure III 11. Puits de surface.....	31
Figure III 12. Puits artésien.....	32
Figure III 13. L'enfouissement des substances polluantes.....	33
Figure III 14. Le biseau salé - douce.....	34
Figure III 15. Développement des terrains karstiques.....	35
Figure III 16. Geysers et les sources chaudes.....	36

Chapitre IV : Géotechnique

Figure IV 1. Géotechnique et domaine d'application.....	40
Figure IV 2. Différentes couches de chaussée.....	41
Figure IV 3. Dimensions des granulats.....	44
Figure IV 4. Analyse granulométrique par tamisage.....	46
Figure IV 5. Analyse granulométrique.....	46
Figure IV 6. Teneur en eau du sable est proche de l'optimum Proctor.....	47
Figure IV 7. L'essai Proctor.....	48
Figure IV 8. Equipement essai Proctor.....	49
Figure IV 9. La machine Los Angeles.....	49
Figure IV 10. Essai Micro Deval.....	50

Chapitre V : Environnement

<i>Figure V 1. Pollution environnementale</i>	<i>57</i>
<i>Figure V 2. La combustion de carburants fossiles entraine un renforcement de l'effet de serre</i>	<i>58</i>
<i>Figure V 3. Rayonnement infrarouge terrestre intercepté par les gaz à effet de serre</i>	<i>58</i>
<i>Figure V 4. La température et l'effet de serre</i>	<i>59</i>
<i>Figure V 5. Evolution depuis 1850 des teneurs atmosphériques de plusieurs gaz à effet de serre (CO₂, CH₄, N₂O et CFC).....</i>	<i>60</i>
<i>Figure V 6. Les émissions anthropiques de SO₂ (en millions de tonnes de soufre par an).....</i>	<i>61</i>
<i>Figure V 7. Le bilan radiatif et sa perturbation anthropique (Impact estimé de l'effet de serre et de l'effet parasol sur le bilan énergétique de la terre).....</i>	<i>62</i>
<i>Figure V 8. Variation temporelle de CH₄, CO₂ et climat depuis des milliers d'années.....</i>	<i>63</i>
<i>Figure V 9. Conséquences de réchauffement climatique.....</i>	<i>64</i>

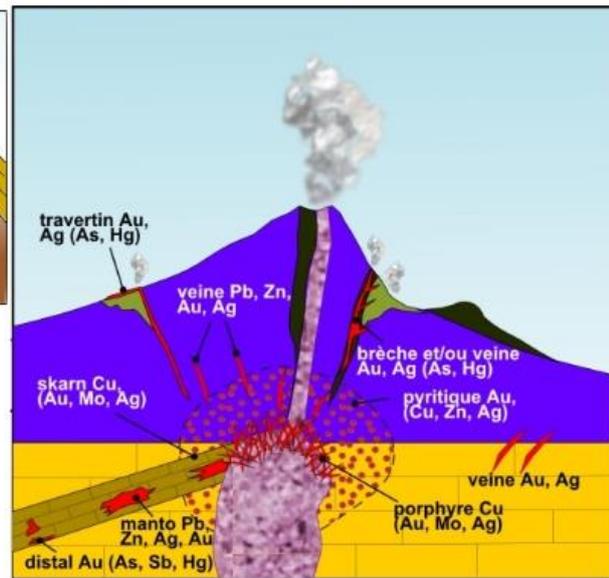
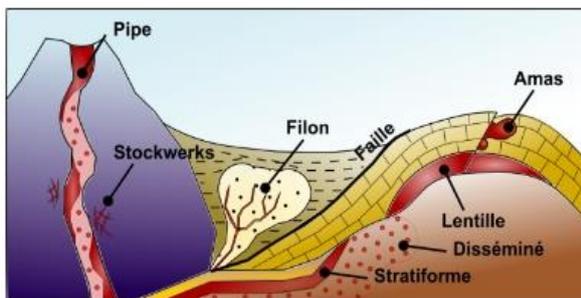
Liste des tableaux

<i>Tableau I 1. Les minéraux dans les principaux groupes et leurs usages.....</i>	<i>10</i>
<i>Tableau III 1. Porosité efficace de quelques roches</i>	<i>25</i>
<i>Tableau III 2. Différence entre nappe libre et captive.....</i>	<i>29</i>
<i>Tableau III 3. Caractéristiques physiques des réservoirs</i>	<i>31</i>

Géologie minière

A la fin de ce chapitre l'étudiant sera capable de comprendre :

- Les termes scientifiques liés au domaine de Géologie minière ;
- Les minerais ;
- Les types de Minéralisation ;
- Les différents types de gisements métallifères et de substances utiles.



1. Généralité (Définition des termes scientifiques)

Dans le domaine de la géologie minière il est très important de distinguer entre les termes suivants (Jébrak et al., 2008) :

- Un gîte : est une concentration anormale d'un élément chimique donné dans une formation rocheuse ;
- Gitologie : est l'étude des gîtes donc des gisements. C'est l'étude descriptive et l'interprétation des concentrations naturelles des métaux ou d'autres substances non métallifères. Elle prend en compte, la genèse et la typologie, des gisements. Il s'agit en réalité de l'étude des éléments chimiques dans leur groupement minéraux et particulièrement leur concentration anormale dans l'écorce terrestre ;
- Un minéral : C'est un inorganique solide qui se présente sous forme cristallographique bien déterminé ;
- Gisement minéral : Toute masse de substance minérale susceptible d'être exploitée dans les conditions techniques, économiques et sociales du moment. La notion de gisement minéral est directement dépendante de la satisfaction de besoins industriels et de profits ;
- Mine : C'est un terme qui désigne l'endroit où on exploite le minéral qui peut être souterrain ou à ciel ouvert ;
- Carrière : C'est un terme utilisé pour les roches ;
- Cristal : est un corps solide (minéral naturel homogène) de forme polyédrique, plus ou moins brillant, à structure régulière et formé d'un assemblage ordonné d'un grand nombre d'atomes de molécules ou d'ions.



Figure I. 1. Formes cristallographiques pour certains minéraux

- Minéralisation : La minéralisation c'est la formation d'un minéral à partir d'autres minéraux, ou le déplacement (très lent) d'une substance minérale (par exemple du cuivre) dans une roche ;
- Minerai : C'est une substance utile, minérale naturelle solide renfermant une teneur suffisante en métal ou matière première dont l'extraction génère des profits. Cette substance peut être exploitée et vendue après un traitement industriel physico-chimique.

Ce traitement s'appelle la minéralurgie.... L'uraninite est un minerai d'uranium, la bauxite un minerai d'aluminium, la pyrite, un minerai de fer, etc ;

- Métallogénie : Etude de la genèse des minéralisations d'un gîte (somme des processus à l'origine du gîte tel qu'il est observable aujourd'hui) ;
- Minéralurgie : Ensemble des techniques permettant, à partir de substances minérales brutes, d'obtenir des produits utilisables industriellement.

Les corps minéralogiques sous 3 formes :

- Régulière : généralement sont les filons en couche lentille (Fig. I 2a : filon de barytine blanche) ;
- Semi régulière : est une roche ignée ultrabasique riche en éléments volatils et que l'on trouve, sous forme de brèches, dans des cheminées (kimberlite) (Fig. I 2b) ;
- Irrégulière : des amas dissémination. Ama : échange entre granit et schiste avec fluide dissémination roche grain de cuivre.

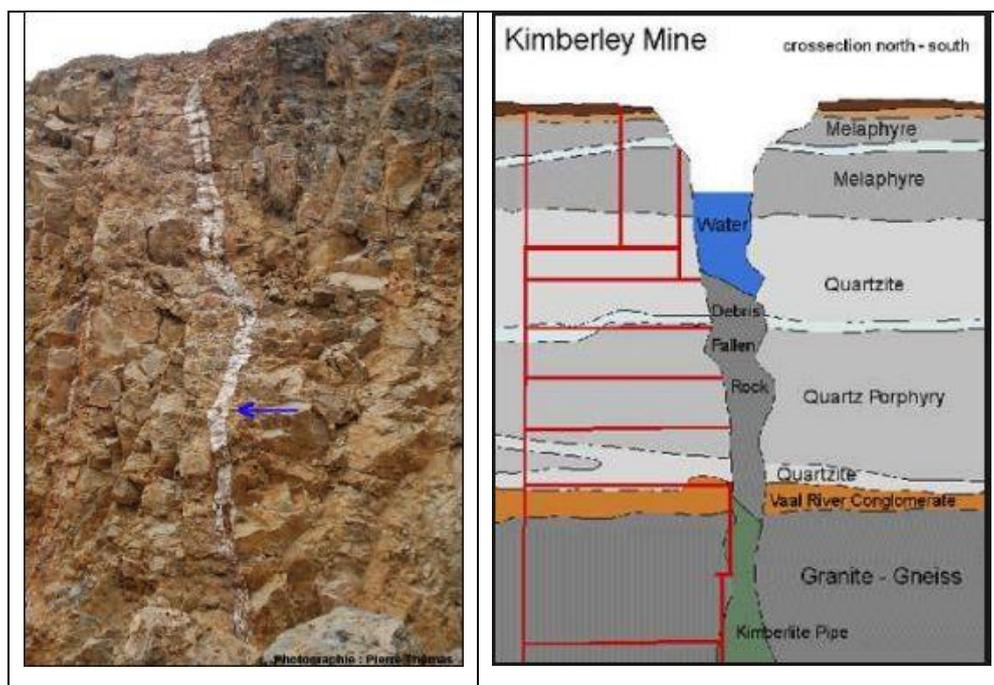


Figure I. 2. Formes des corps minéralogiques.

2. Notion de gisements

En géologie et dans le domaine de l'industrie minière ou pétrolière, un gisement est une concentration d'une ressource naturelle dans le sol ou le sous-sol que l'on peut exploiter en construisant une mine à ciel ouvert, souterraine et/ou des puits de forage.

Les minéraux industriels servent dans diverses industries en raison de leurs propriétés physiques ou chimiques telle la dureté, la blancheur, la pureté, l'inertie chimique, la conductivité thermique et électrique (Beck, 1904; Routhier, 1958).

3. Classification des gisements métallifères

Il y a diverses façons de classer les gîtes métallifères. Une façon simple est de les regrouper selon les processus qui les ont formés. Il existe des classifications élaborées au cours du 20^{ème} siècle basée sur le type de roche dans lequel se trouvent les gisements ou sur la géométrie du gisement et sa relation avec son encaissant (*Bouladon, 1964*). Cependant, ces types de classifications ont désormais été largement remplacés par d'autres types de classifications dans lesquels le critère de base est le processus responsable de la minéralisation (Fig. I 3) ;

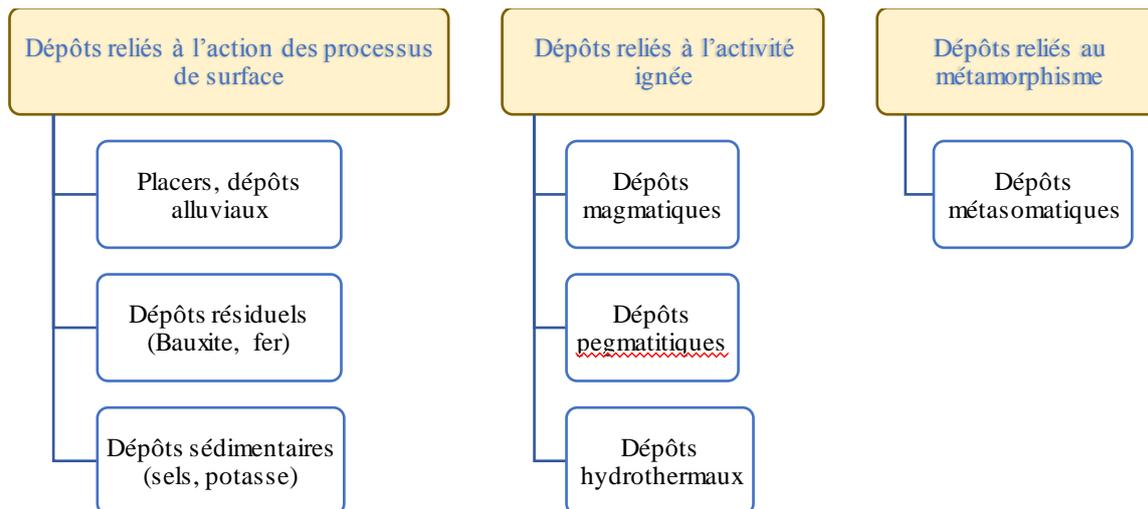


Figure I. 3. Classification des gisements selon le processus responsable de la minéralisation

3.1. Gîtes reliés aux processus superficiels

Différents processus de formation possibles pour les gisements reliés aux processus de surface :

3.1.1. Plaçers

L'accumulation dans un piège de minéraux transportés par les eaux après érosion des roches mères : gisements « détritiques » ou « placers » (*Bingtao, 1989*),

Les pépites d'or qu'on retrouve dans les sables des rivières (l'or alluvionnaire) proviennent de l'érosion de veines ou de filons qui contenaient de l'or natif. Cet or a été transporté par les cours d'eau sous forme de particules qui se sont arrondies (l'or est très tendre), puis déposées. Quand il y a des concentrations significatives en or dans des dépôts alluvionnaires, on appelle ces dépôts des placers.

3.1.2. Dépôts résiduels

L'altération d'une roche préexistante ayant perdu par dissolution une partie importante de ses constituants s'est donc enrichie en certains minéraux.

Par exemple, l'altération sous des conditions climatiques chaudes et très humides de roches ignées felsiques riches en feldspaths conduit à libérer l'aluminium des feldspaths et à le

combiner à des radicaux OH pour former un hydroxyde d'aluminium hydraté, la bauxite, qui est le minéral d'aluminium (*Duparc et Amstutz, 1932*).

3.1.3. Dépôts sédimentaires

Les bassins sédimentaires représentent des environnements favorables pour certaines minéralisations car ils présentent un régime thermique particulier et sont le lieu de circulations hydrothermale. Les minéralisations sont de deux types selon le moment auquel elles se forment par rapport à l'évolution du bassin. Le type *syngénétique* se rapporte à des minéralisations contemporaines à la sédimentation du fond du bassin. Le deuxième type de minéralisations, *epigénétique*, correspond à des circulations tardives dans le bassin (Fig. I 4).

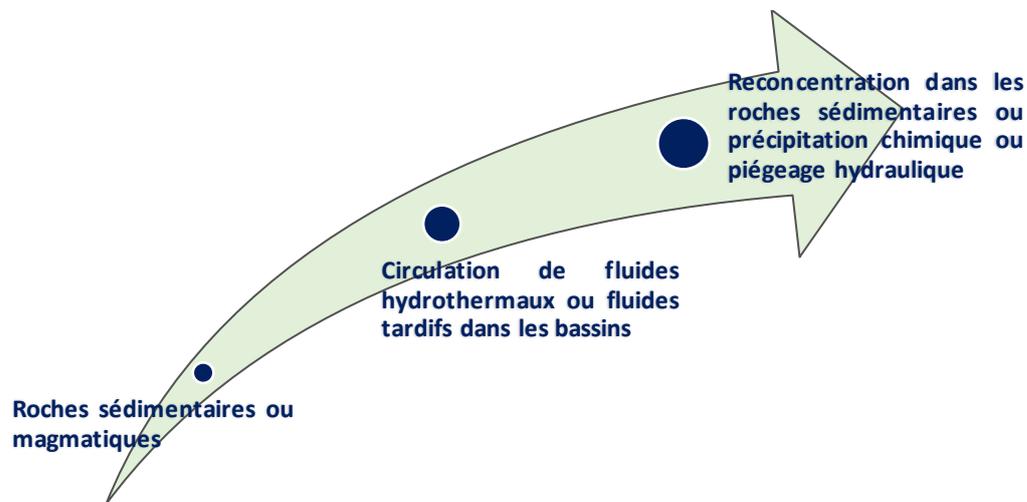


Figure I. 4. Minéralisation liée par l'évolution du bassin sédimentaire

3.2. Gîtes reliés aux processus de l'activité ignée

Les processus de l'activité ignée sont responsables de plusieurs types de gîtes métallifères.

La forme de ces gisements est on 3 types (*Orcel, 1954*) :

- En inclusion et amas dans les roches magmatiques ;
- En imprimassions dans les roches métamorphiques ;
- En filon dans les fissures aussi bien dans les roches magmatiques, métamorphiques et sédimentaires.

Pour illustrer ces types de gîtes, le schéma qui suit montre un grand corps intrusif qui s'est mis en place dans une séquence de roches sédimentaires (Fig. I 5).

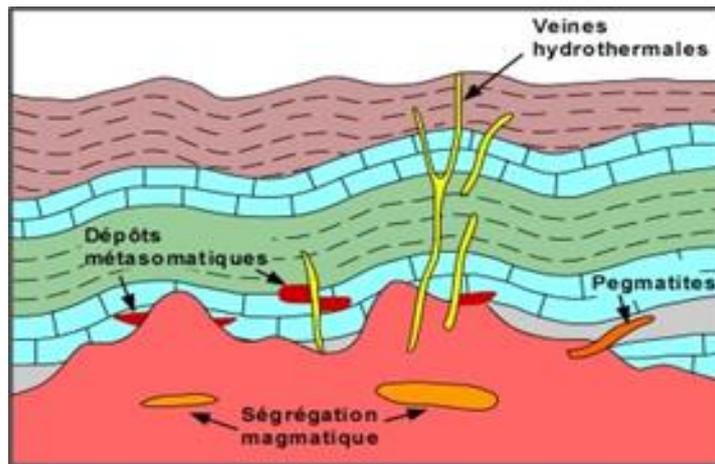


Figure I. 5. Gîtes liés aux processus de l'activité ignée

3.2.1. Gisement primaire lié aux roches magmatiques (Dépôt magmatique)

Est constitué par les processus de ségrégation magmatique. Durant la cristallisation du magma, il peut se produire des ségrégations très locales de métaux qui donnent des concentrations éventuellement exploitables. Ce type de gîte se trouve dans la roche magmatique même. Comme exemple de gîtes issus de ségrégation magmatique, on peut signaler l'anorthosite, le fameux granite noir, et qui constitue la principale réserve mondiale de ce minerai. Le diamant vient d'une concentration de carbone dans une roche ignée ultramafique qu'on appelle kimberlite et qui se forme dans les cheminées profondes des volcans.

3.2.2. Dépôts pegmatitiques

Sont des roches magmatiques à très grands cristaux qui contiennent parfois des minéraux riches en éléments normalement rares (lithium, nobélium, tantale, zirconium, uranium, thorium, etc.) et en quantité suffisante pour être exploités.

Deux processus magmatiques principaux sont à l'origine des minéralisations (Fig. I 6) :

- La cristallisation fractionnée, par accumulation de cristaux par différence de densité, produit une modification de la composition du magma résiduel. Ce processus entraîne la formation de magmas très différenciés, et conduit à des concentrations primaires d'éléments métalliques.
- Les minéralisations sont généralement le résultat de processus d'immiscibilité d'un liquide, sulfuré ou oxydé, dans un magma silicaté. Cette immiscibilité peut être provoquée par divers phénomènes : un changement de composition par assimilation de l'encaissant, un mélange de magmas, des changements de température ou de pression. Le liquide ainsi formé est plus dense que le magma silicaté et va migrer dans la chambre magmatique.

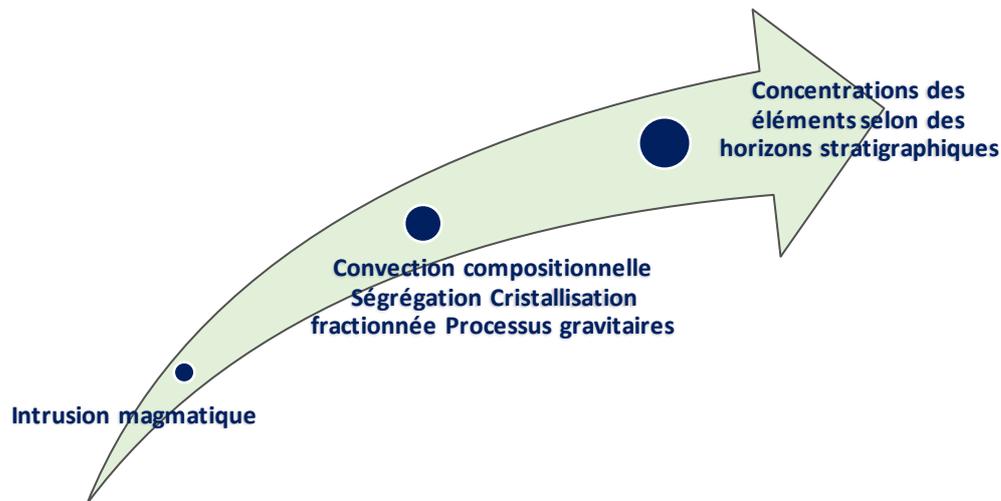


Figure I. 6. Processus de minéralisation des dépôts pegmatitiques

3.2.3. Gisement lié aux processus hydrothermaux

Les gisements hydrothermaux sont la principale source mondiale pour la majorité des métaux (Pb, Zn, Mo, Ag, Cu, Au, U, les pierres précieuses, l'argile, le quartz). Il existe différents types de gisement hydrothermaux en fonction du contexte géodynamique (limite de plaque, intrusions granitiques, plancher océanique, bassins sédimentaires). Ces gisements se caractérisent par l'origine et la température des fluides porteurs qui contiennent des teneurs non négligeables en CO_2 et/ou CH_4 .

Le processus hydrothermal est lié à la circulation de fluides profonds transportant des métaux dans la croûte terrestre. L'origine de ces fluides peut être magmatique, métamorphique ou provenir d'eaux météoriques (que l'on trouve en profondeur dans la croûte terrestre). Lorsque les fluides sont généralement drainés et piégés dans des fractures de différente taille et géométrie, les minéraux se déposent par précipitation (Grabezhev et al., 1972).

On sait que les sources hydrothermales des fonds océaniques déposent des sulfures massifs. C'est ainsi qu'on explique aujourd'hui plusieurs gîtes de sulfures massifs riches en cuivre, plomb, zinc, nickel de la ceinture de l'Abitibi, la zone la plus riche en mines au Québec.

Ainsi, lors de la mise en place d'un intrusif et durant son refroidissement, il se fait des fractures dans la roche encaissante. Les fluides hydrothermaux provenant du magma, c'est-à-dire les eaux chargées de métaux comme l'or, l'argent, le cuivre et bien d'autres, circulent dans ce réseau de fractures et viennent précipiter ces métaux sous forme de sulfures ou d'éléments natifs pour former des veines. Les fameux filons et veines d'or de l'Abitibi ont été formés par les fluides hydrothermaux qui sont venus précipiter dans les grandes failles.

Les fluides hydrothermaux qui circulent dans le réseau de fractures peuvent venir minéraliser la roche encaissante (plages rouges sur le schéma). C'est ce qu'on appelle de la minéralisation

de métasomatisme. Certains types de roches sont plus sensibles à ce genre de minéralisation que d'autres. Par exemple, les calcaires (briques bleues) sont plus susceptibles que les autres roches d'être minéralisés en cuivre s'ils sont traversés par des solutions riches en cuivre ; on les appelle alors des *skarns* (Karaouet et al., 2020) (Fig. I 7).

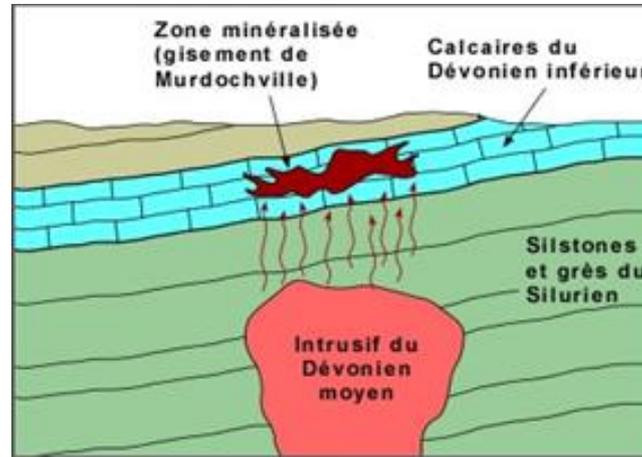


Figure I. 7. Minéralisation de type métasomatique à travers d'un fluide hydrothermal (Skarn)
La minéralisation en cuivre de la région de Murdochville en Gaspésie constitue un bon exemple. Les couches calcaires du Dévonien inférieur de la région de Murdochville contiennent des horizons calcaires qui ont été minéralisés en cuivre à la faveur de fluides hydrothermaux issus d'une masse intrusive sous-jacente qui a transformé localement le calcaire en skarn.

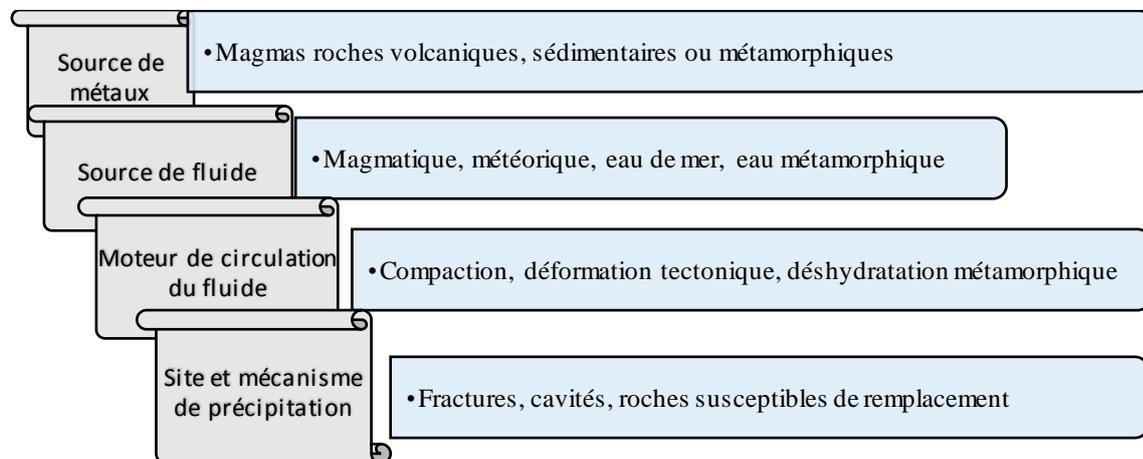


Figure I. 8. Dépôts liés aux fluides hydrothermaux

Dans les gisements liés aux processus de l'activité ignée on a 3 types de formation des métaux :

a) Gisements pneumatolitiques

Ils sont formés par précipitation des métaux à partir de l'état volatil (gaz), grâce à cet état volatil le milieu a une haute pression. Cette pression de vapeur et de gaz crée une fracturation très fine

presque désordonné. Les métaux qui concernent cette espèce de concentration sont l'étain (Sn), Volfram (w), molybdène (MO).

b) Gisements métasomatiques

Ce type de gisement se mis en place par une fuite métasomatique (par un échange de matière entre le corps plutonique et les roches encaissantes). Exemple : marbre minéralisé.

Les métaux sont transportés toujours à l'état de gaz par exemple : minéralisation de magnétite, hématite, Chalcopyrite, pyrite, Cassitérite.

c) Gisements liés au fluide hydrothermal

Les gisements hydrothermaux se mettre en place dans les roches encaissantes plus ou moins lointain de plutonique. Les gisements les plus chaud se mettre en place près du pluton, et le contraire pour les gisements moins au moins chaud.

En tenant compte de la température, les gisements hydrothermaux peuvent être classer en trois types :

- Gisement hypo thermal (400 – 300°C) : Un peu d'oxide. Parmi les minéraux on trouve : Magnétite, Hématite, Pyrite et Chalcopyrite et comme minéraux de gongue on a Silicate
- Gisement méso thermal (200 – 300°C) : la Galène et le Cuivre. La gongue est essentiellement carbonatés
- Gisement épi thermal (200 – 50°C) : Cinabre, l'antimonite et les minéraux Argentifère. La gongue est carbonatés

4. Exemples de gisements liés aux processus superficiels

4.1. Les gisements de type marin (Exemple fer oolithique)

Ces gisements peuvent donner des zones exploitables, sous forme stratifiée, contenant des fossiles indiquent le milieu marin (Céphalopode)

Oolithe + fossile >> Oolithe ferrugineux >> Limonite (oxide de fer hydraté)

Le fer a deux origines hypothétiques possible :

- a) Origine hydrothermale provenant de la profondeur de la mer, ces eaux chaudes sont chargé d'oxide de fer et se déposent près de ces calcaires oolithiques ou le fer pourra se substituer on carbonate de calcium de ces oolithes
- b) Lessivage et érosion de montagnes qui amener le fer qui sera transporté par les cours d'eau vers la mer. Cet oxide de fer sera dissous dans l'eau de mer et par la suite les organismes peuvent l'incorporer dans leur organisme et le fer dans ce cas-là se déposera par le squelette d'organisme après leur mort et formera les vases rouge riche en fer. Exemple Lac et marais de Scandinavie (Ferland et la Pologne). L'exploitation se fait par draguage des fonds

4.2. Les gisements détritiques :

Gisement exogène qui se forme par érosion puis par transport puis la triée et la sédimentation dans les gisements fluviaux et parfois aussi dans les gisements littoraux, de tels gisements provenant directement de la destruction de gisement primitifs sont dit de gisement sédimentaire détritique ou Placer

Exemple : Californie gisement Placer d'Or (400 Km de distance de l'or « sable contient de l'or »), Cybirie, Malysie (Placer étain)

5. Les modes d'occurrence des gîtes métallifères

Le schéma qui suit expose trois situations par rapport à la surface (Fig. I 9). La couverture de sédiments au-dessus de la roche solide est souvent appelée le mort-terrain. Une première situation est celle que recherche le prospecteur traditionnel, c'est-à-dire le gisement dont une partie affleure. C'est grâce à la découverte d'indices minéralisés à l'affleurement (un "showing" en langage de prospecteur), qu'on soupçonne d'abord la possibilité d'un gisement. C'est la situation la plus simple, puisque on peut déjà faire des analyses sur des prélèvements de surface. Si ces analyses s'avèrent positives et qu'on veuille procéder à des forages exploratoires, le fait de pouvoir observer la structure des roches sur le terrain guidera la position et l'orientation des forages.

Une seconde situation est celle où le gisement perce à la surface de la roche de fond, mais est recouvert par le mort-terrain : c'est le gisement enfoui. Evidemment ce type de gisement échappe à l'œil du prospecteur. Il faut donc compter sur d'autres méthodes de prospection pour pouvoir le détecter.

Le troisième type de gisements est celui qui se trouve entièrement à l'intérieur de la masse rocheuse : c'est le gisement aveugle.

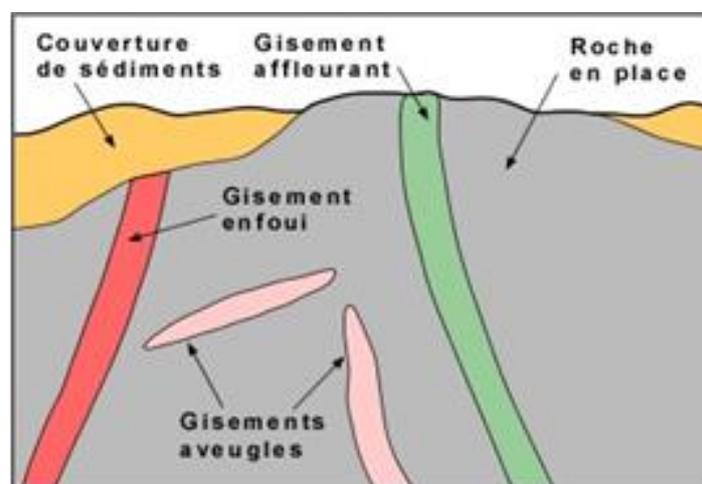


Figure I. 9. Les modes d'occurrence des gîtes métallifères

6. Critères d'exploitation d'un gisement

Pour l'exploitation d'un gisement il faut suivre les étapes suivantes :

- Comprendre comment les gisements sont formés est primordial pour trouver de nouvelles ressources minérales (phase de prospection) ;
- Pour que ces gisements soient ensuite exploités, d'autres critères doivent être pris en compte tels que la morphologie des gisements (prospection géophysique) et leur rentabilité économique ;

La morphologie des gisements (profondeur, taille, forme) a un impact sur les techniques à mettre en œuvre pour l'exploitation des ressources, et donc sur le coût d'exploitation.

- La concentration (clarke) du gisement est extrêmement importante dans la décision d'exploiter ou pas le gisement.

Tableau I 1. Les minéraux dans les principaux groupes et leurs usages

GROUPE	MINÉRAL	FORMULE	USAGE
ÉLÉMENTS NATIFS	Or	Au	Échange, joaillerie joaillerie, photographie conducteurs électriques gemmes, abrasifs mines à crayons, lubrifiants médicaments, produits chimiques catalyseurs, alliages
	Argent	Ag	
	Cuivre	Cu	
	Diamant	C	
	Graphite	C	
	Soufre	S	
	Platine	Pt	
OXYDES	Hématite	Fe ₂ O ₃	minerai de fer minerai de fer gemme, abrasif
	Magnétite	Fe ₃ O ₄	
	Corindon	Al ₂ O ₃	
SULFURES	Galène	PbS	minerai de plomb minerai de zinc "or des fous" minerai de cuivre minerai de cuivre minerai de mercure
	Sphalérite	ZnS	
	Pyrite	FeS ₂	
	Chalcopyrite	CuFeS ₂	
	Bornite	Cu ₅ FeS ₄	
	Cinabre	HgS	
SULFATES	Gypse	CaSO ₄ .H ₂ O	plâtre et panneaux plâtre et panneaux boue de forage
	Anhydrite	CaSO ₄	
	Barite	BaSO ₄	
CARBONATES	Calcite	CaCO ₃	ciment Portland ciment Portland minerai de cuivre, joaillerie minerai de cuivre, joaillerie joaillerie
	Dolomite	CaMg(CO ₃) ₂	
	Malachite	Cu ₂ (OH) ₂ CO ₃	
	Azurite	Cu ₃ (OH) ₂ (CO ₃) ₂	
	Rhodochrosite	MnCO ₃	
SILICATES	quartz	SiO ₂	verre, horlogerie, calculatrices poudre pour bébés isolant céramique
	talc	Mg ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	
	amiante	Mg ₆ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₈	
	kaolinite	Al ₄ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₈	
HALOGÉNURES	Halite	NaCl	sel commun fabrication des aciers fertilisants
	Fluorite	CaF ₂	
	Sylvite	KCl	
HYDROXYDES	Limonite	FeO(OH).nH ₂ O	minerai de fer, pigment minerai d'aluminium
	Bauxite	Al(OH) ₃ .nH ₂ O	

TD-1**La prospection minière et la présentation de quelques gisements en Algérie**

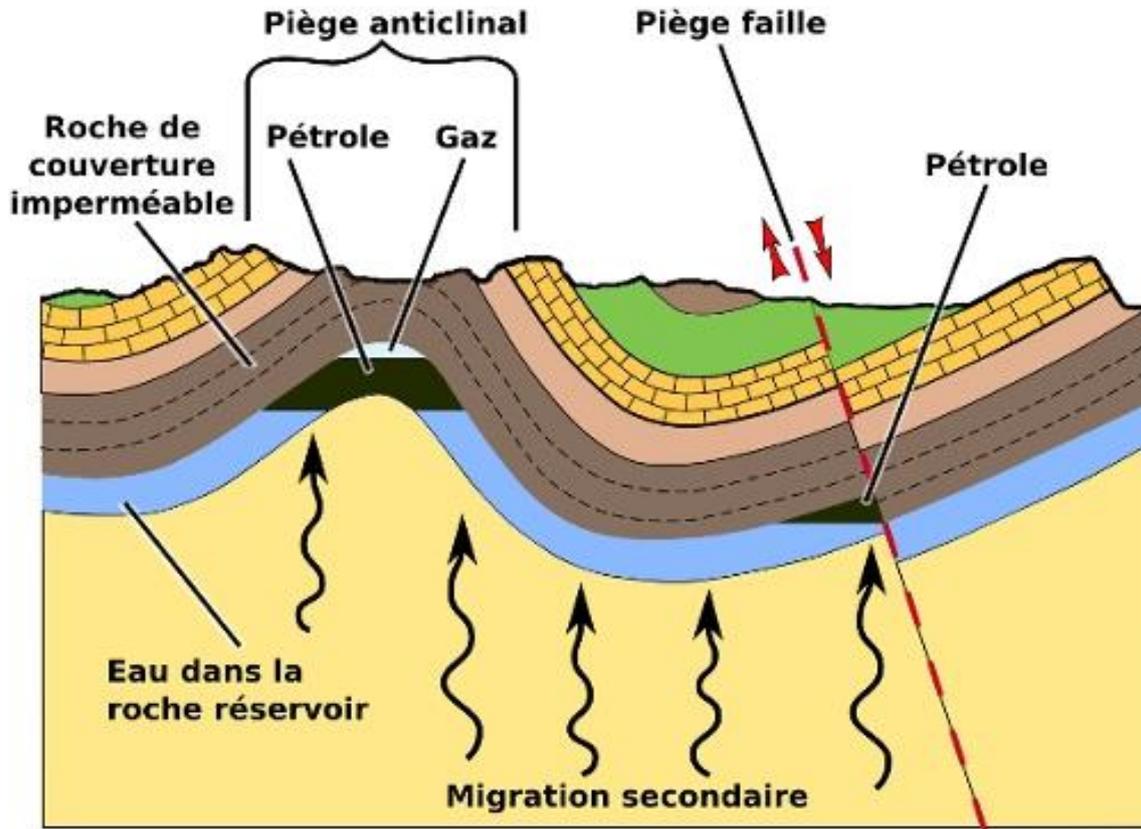
Il faut une **conjoncture géologique spécifique pour que se forme un gisement métallifère**. Cela implique qu'une bonne stratégie de prospection s'occupera d'abord de bien comprendre le contexte géologique et de cibler des régions à partir de modèles **métallogéniques**. Par exemple, on a vu que les sources hydrothermales dans les rifts océaniques déposaient des sulfures massifs. On cherchera donc à identifier dans les dépôts anciens ce qui représente de tels contextes, par exemple, des suites de basaltes océaniques.

La cartographie géologique de surface contribue à mieux définir le contexte d'une région et possiblement à découvrir des indices affleurants. Mais, pour repérer des **dépôts enfouis ou aveugles**, on doit faire appel à des **méthodes géochimiques ou géophysiques**.

- **Les méthodes géophysiques** recherchent des anomalies, au niveau de la gravité, du magnétisme terrestre, de la conductivité électrique des terrains, etc. Par exemple, une masse de sulfures massifs en profondeur, dans des terrains sédimentaires ou ignés, cause une anomalie de la gravité, du fait que les sulfures ont des densités qui sont plus élevées que les roches encaissantes. Un relevé gravimétrique, c'est-à-dire des mesures fines et précises de la gravité selon un quadrillage serré dans une région donnée permettra de mettre en évidence ce genre d'anomalie et de soupçonner la présence de sulfures massifs en profondeur. Les spécialistes sont même en mesure d'évaluer le volume de la masse et sa profondeur. **Un gisement riche en fer pourra donner des anomalies au niveau du magnétisme terrestre ou de la conductivité électrique des terrains.**
- **Les méthodes géochimiques** sont applicables surtout aux gisements **enfouis**. Elles consistent à analyser les **dépôts meubles du mort-terrain** pour leur contenu en divers éléments métalliques et tenter d'isoler des anomalies. Par exemple, si un dépôt enfoui de sulfure de cuivre a été érodé, il est probable que les sédiments qui résultent de cette érosion présentent des concentrations anormales en cuivre, **témoignant de la proximité du dépôt**. **La méthode géochimique est peu applicable aux gisements aveugles.**

Exposé : Présentation de quelques gisements en Algérie.

Géologie pétrolière



Ce chapitre vise à doter les étudiants des connaissances et compétences pour les rendre capable à maîtriser :

- *Les gisements pétroliers ;*
 - *Origine*
 - *Roches mères*
 - *Roches couvertures*
 - *Pièges et réservoirs*
- *Les gisements de charbon ;*
- *Les limites d'obtention d'un champ de pétrole ou charbon ;*
- *La stratégie d'exploitation.*

1. Généralité

Le pétrole est issu de la décomposition de matières organiques accumulées au fond des océans il y a environ 450 à 500 Millions d'années, en absence d'oxygène, avec la chaleur interne et en présence de micro-organismes (*Sallé and Debyser, 1976*).

Qu'est-ce qu'un carburant ?

Les carburants sont des hydrocarbures (corps organique uniquement composé d'atome et d'hydrogène). La formule chimique des hydrocarbures utilisés en automobile se présente généralement sous la forme :



n et m représente le nombre d'atomes respectifs en carbone et hydrogène de la molécule.

Quand on parle des combustibles fossiles, on se réfère aux hydrocarbures, pétrole et gaz naturel, ainsi qu'au charbon

2. Formation des hydrocarbures (Pétrole et gaz naturel)

La formation des hydrocarbures passe par les étapes suivantes (*Biju-Duval, 1999*) :

2.1. Accumulation de la matière organique

Les hydrocarbures viennent de la matière organique. Il y a deux sources principales de sédiments dans un bassin océanique (Fig. II 1) :

- La charge terrigène provenant de l'érosion des continents, qui se dépose d'abord sur les deltas et est ensuite dispersée sur le plateau continental où elle dépose préférentiellement dans la partie offshore du plateau, puis finalement apportée au pied du talus sur le glacis continental ;
- La charge allochimique provenant du bassin même, principalement de la couche de plancton.

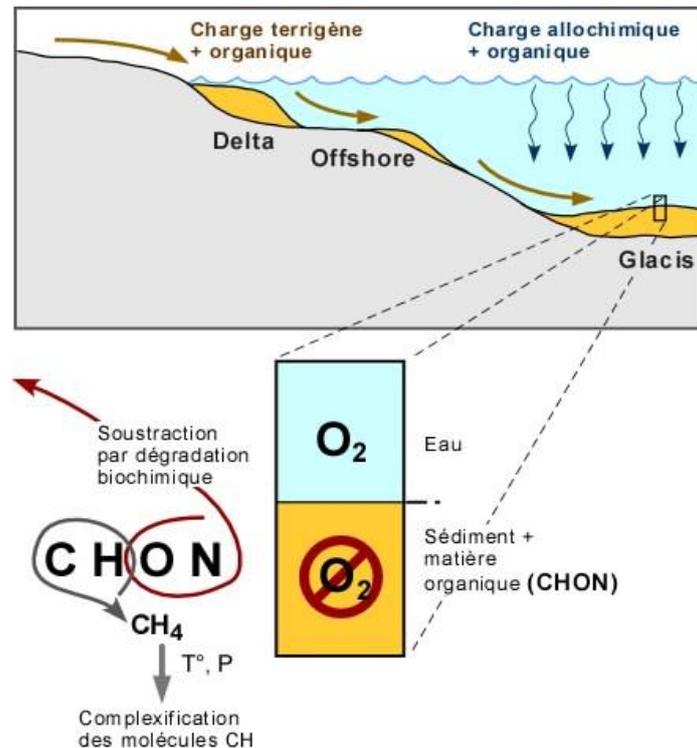


Figure II 1. Sources de la matière organique

Dans les deux cas, les sédiments contiennent une certaine quantité de matière organique qui, dans le cas des terrigènes, a été transportée avec les particules minérales et enfouie rapidement, se trouvant ainsi protégée de l'oxydation. Dans le cas des allochimiques, cette quantité est représentée par la fraction de la biomasse du plancton qui n'a pas été oxydée durant la sédimentation. Ces quantités de matière organique peuvent atteindre les 10, 15 et même 20% du volume du sédiment. Compte tenu du grand volume de sédiments déposé, le volume de matière organique est donc aussi très important.

2.2. Dégradation biochimique et thermique de la matière organique

L'eau au-dessus du sédiment peut contenir une certaine quantité d'oxygène libre (O_2). Par contre, dans le sédiment, le peu d'oxygène libre qu'il peut y avoir est rapidement consommé par l'oxydation d'une partie de la matière organique, ce qui fait que les conditions dans le sédiment deviennent rapidement des conditions anoxiques (sans oxygène ; un milieu anaérobie). La matière organique, composée de carbone, hydrogène, oxygène et azote (CHON), est protégée de l'oxydation, mais non de l'action des bactéries anaérobies. Ces bactéries viennent chercher dans les molécules organiques, l'oxygène et l'azote dont elles ont besoin pour leur métabolisme (elles soustraient donc les O et les N, laissant les carbones (C) et les hydrogènes (H)) : **c'est la dégradation biochimique de la matière organique.**

Les carbones et les hydrogènes s'unissent alors pour former de nouvelles molécules composées principalement de ces deux éléments et qu'on appelle des hydrocarbures (HC). Une des

premières molécules à se former est le CH_4 (le méthane, gaz naturel). Ce méthane se forme dans les couches supérieures du sédiment (gaz biogénique, parce qu'il est le produit de la dégradation biochimique).

A mesure de l'empilement des sédiments sur le plancher océanique (ce qui se mesure en milliers de mètres), les molécules d'HC sont amenées à des températures et pressions de plus en plus élevées ; c'est l'enfouissement. A partir d'ici, les molécules d'hydrocarbures vont devenir de plus en plus complexes. La dégradation passera de biochimique (régie par les bactéries) à **thermique** (régie par l'augmentation de température). Le schéma qui suit résume ce qui se passe à mesure de l'enfouissement et comment se forme l'huile et le gaz (Fig. II 2).

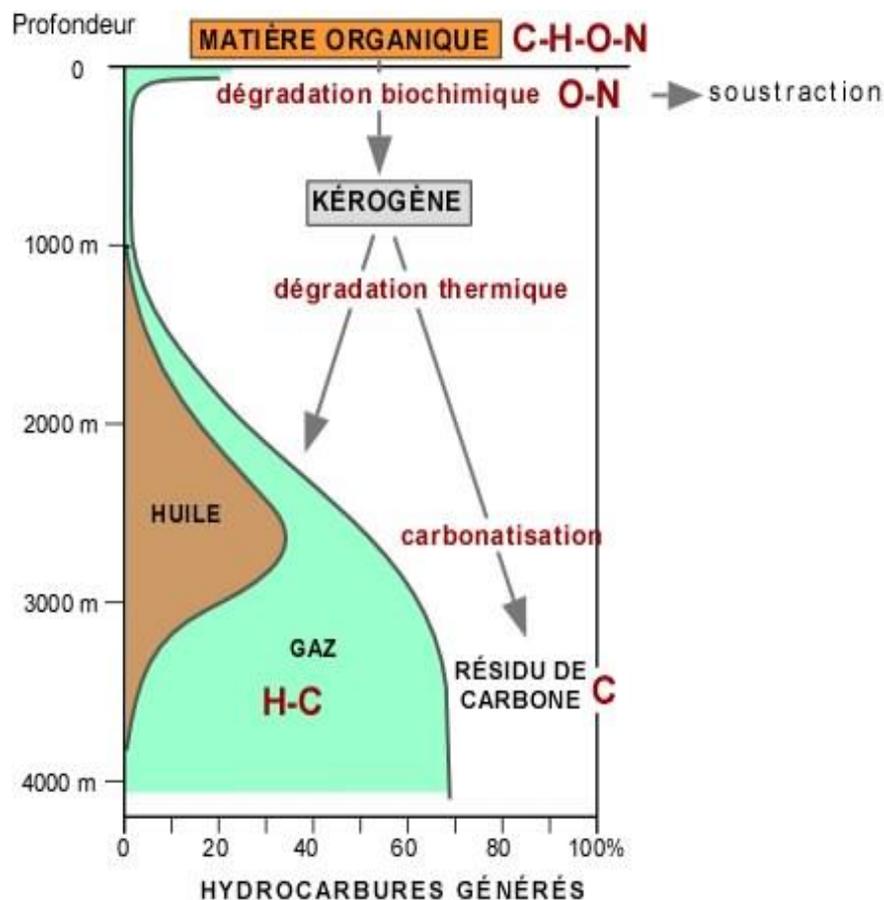


Figure II 2. Pourcentage d'hydrocarbure générés (pétrole et gaz) en fonction de l'enfouissement

La figure ci-dessous montre que :

- Dans le premier 1000 mètres, ce sont toujours les bactéries qui agissent. Le processus dominant dans cette zone est la dégradation biochimique qui transforme les matières organiques en un hydrocarbure qu'on appelle kérogène, une sorte de pétrole embryonnaire.

- Sous les 1000 mètres, la dégradation biochimique est remplacée par une transformation contrôlée par l'augmentation de la température (dégradation thermique). L'enfouissement conduit, d'une part à une transformation progressive du sédiment en roche et, d'autre part, à cette dégradation thermique des kérogènes.
 - A 2000 mètres par exemple, une partie des kérogènes se transforme en huile, un peu plus de 10% ici, une plus petite partie en gaz, et la plus grande partie poursuit sa transformation.
 - Entre 2000 et 3000 mètres, c'est là que le kérogène produit le plus d'huile.
 - Sous les 3000 mètres, la production d'huile devient insignifiante. Par contre, à partir de 2500 mètres, la production de gaz s'accélère et devient importante. Il s'agit d'un gaz qu'on qualifie de thermogénique, puisqu'il est le produit de la dégradation thermique des kérogènes.
 - A 3500 mètres, on ne produit plus d'huile, mais beaucoup de gaz. La dégradation thermique conduit progressivement à des phénomènes de carbonatation qui transforment les kérogènes non transformés en huile ou en gaz en résidus de carbone.
 - Si l'enfouissement dépasse les 4000 mètres, tout est cuit (les pétroles et gaz sont détruits).

NB. On voit donc qu'il y a des conditions spécifiques d'enfouissement pour former huile ou gaz. En langage pétrolier, on appelle "**fenêtre à l'huile**" cette fourchette de profondeurs où se forme l'huile, et "**fenêtre à gaz**" là où se forme le gaz. Ce qui explique aussi que dans un champ de pétrole il y a pratiquement toujours de l'huile et du gaz.

Ces valeurs de profondeurs ne sont pas absolues, elles sont indicatives, car le gradient géothermique peut varier d'une région à l'autre. En effet, ce qui importe, c'est la température à laquelle ont été portés les kérogènes. On sait que le gradient géothermique défini par le flux de chaleur qui traverse la croûte terrestre, peut varier d'une région à l'autre. Une région qui a connu du magmatisme récent aura un gradient géothermique plus élevé qu'une région où le magmatisme a cessé depuis longtemps, et par conséquent, les pétroles s'y formeront à de plus faibles profondeurs.

2.3.Migration roche-mère à roche-réservoir

La roche dans laquelle se forment les gouttelettes d'hydrocarbures est appelée roche-mère. Il faut en arriver à ce que les gouttelettes se concentrent, en se déplaçant par exemple. C'est le processus de la migration. Il faut que les conditions géologiques soient telles que les gouttelettes en viennent à être expulsées de la roche-mère, puis transportées dans une roche perméable pour

venir se concentrer dans ce qu'on appelle une roche-réservoir où le pétrole se trouve dans les pores de la roche (une sorte de roche éponge) (Fig. II 3).

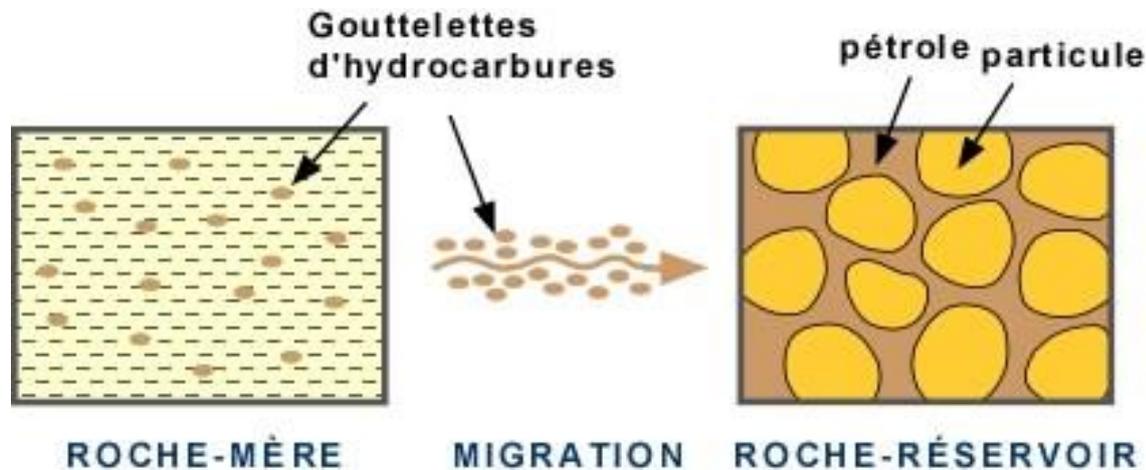


Figure II 3. Processus de concentration des hydrocarbures

La migration des gouttelettes de pétrole se fait grâce au déplacement de l'eau dans les formations rocheuses. En effet, les eaux souterraines se trouvent non seulement dans les couches superficielles, mais aussi en grande profondeur où elles circulent très lentement. Ce sont elles qui en migrant, entraînent les gouttelettes de pétrole.

2.4. Piège

Pour que le réservoir soit scellé pour empêcher la migration de se poursuivre, il y a plusieurs situations géologiques (Fig. II 4) :

- Le piège au sommet de plis anticlinaux où alternent roches perméables et roches imperméables (piège structural A). Les fluides se déplacent des points de plus forte pression aux points de plus faible pression, c'est-à-dire de bas en haut (flèches rouges). Ces fluides sont un mélange d'eau et de gouttelettes d'huile et de gaz. A cause de la barrière à la migration que forme la couche imperméable, les fluides s'accumulent dans la partie haute du pli. Il se fait une séparation des phases selon leurs densités respectives (comme dans un pot de vinaigrette). Le gaz occupera la partie la plus haute, suivi de l'huile puis de l'eau ;
- Une autre situation propice à la formation d'un piège est offerte lorsque les fluides circulant dans une couche perméable sont coincés sous des couches imperméables dans un biseau formé par le déplacement des couches à la faveur d'une faille (piège structural B) ;
- Des lentilles de roches ou de sédiments très perméables contenus dans des couches imperméables peuvent aussi servir de pièges (partie inférieure droite du piège structural C). Par exemple, c'est la situation sur le delta du Mississippi où les sédiments

imperméables boueux, riches en matières organiques à l'origine, servent de roche-mère et les lentilles de sable de réservoirs. Les discordances angulaires, lorsque recouvertes par des couches imperméables, offrent aussi une situation intéressante (partie supérieure droite du piège stratigraphique C) ;

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

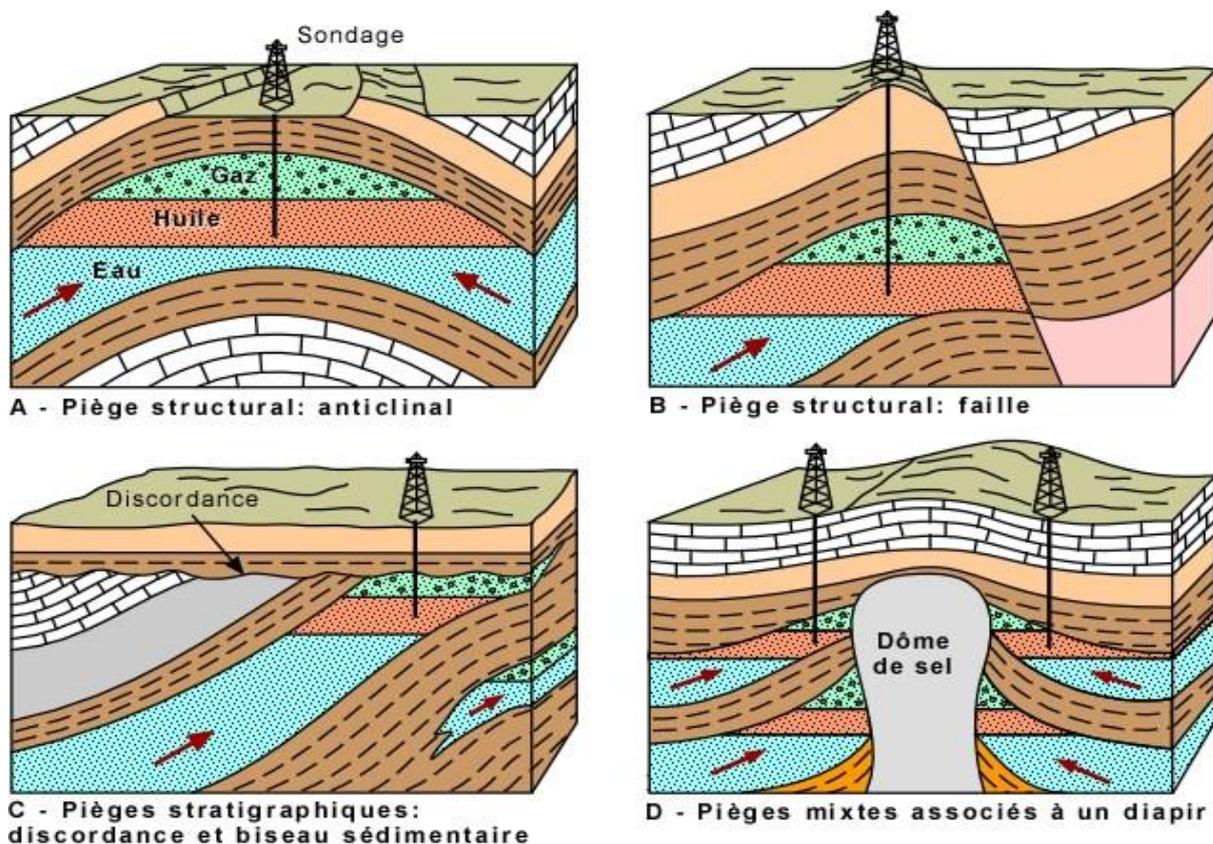


Figure II 4. Architecture des couches géologiques (Pièges)

3. Le charbon

La formation des charbons diffère de celle des hydrocarbures (huile et gaz). Ils sont issus des végétaux terrestres qui s'accumulent dans les zones anoxiques, comme les grands marécages. Ces végétaux sont des produits de la photosynthèse, soit des carbohydrates (carbone, hydrogène et oxygène).

Progressivement, avec l'empilement et l'enfouissement sous les sédiments, les volatiles (oxygène, hydrogène et azote) sont libérés et le carbone se concentre. A la phase où le dépôt contient 50% de carbone on a la tourbe. Avec la poursuite de l'enfouissement, le dépôt se tasse, les volatiles s'échappent et le carbone se concentre de plus en plus. A 72% de carbone, on a le

lignite, à 85% le bitume, puis à 93% l'anhracite (le charbon proprement dit) (*Gastou, n.d.*) (Fig. II 5).

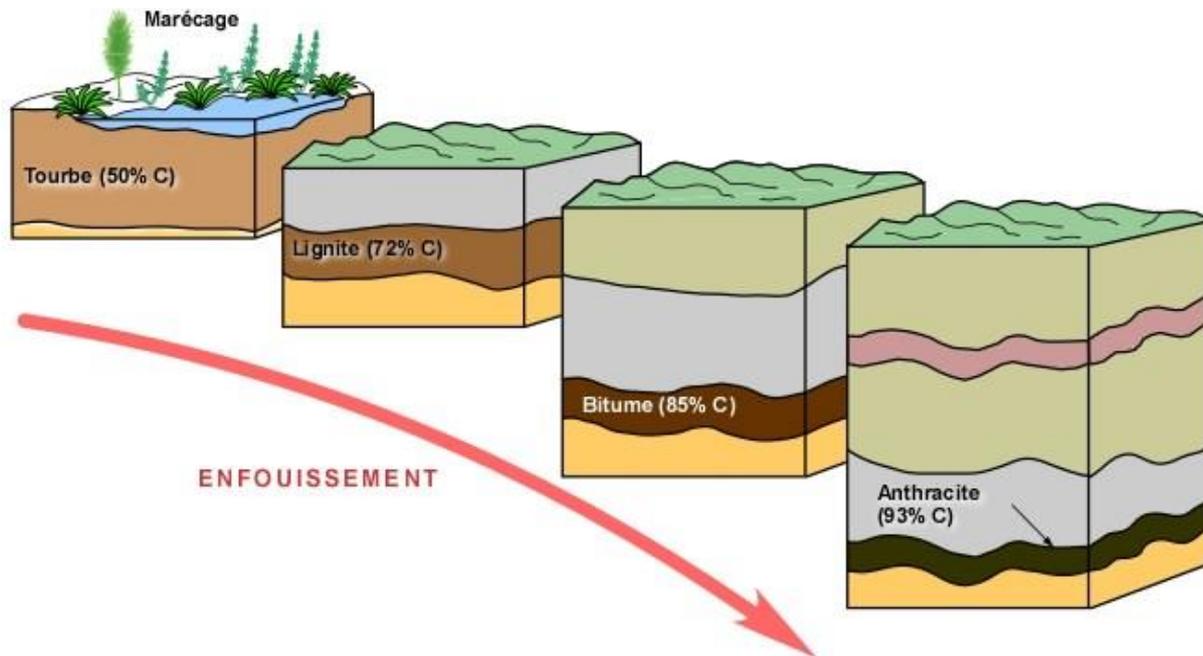


Figure II 5. Etapes de formation du charbon

4. Exploration des combustibles fossiles (hydrocarbures et charbons)

L'obtention d'un champ de pétrole demande une conjoncture géologique bien particulière :

- L'accumulation de matière organique en milieu anaérobie ;
- L'enfouissement juste ce qu'il faut, ni trop peu, ni trop profond ;
- La migration des gouttelettes obtenues par la dégradation biochimique et thermique ;
- La présence d'une roche poreuse et perméable pour accumuler ces gouttelettes ;
- Finalement, une architecture des couches géologiques qui permet qu'une roche couverture imperméable puisse sceller la roche-réservoir et former le piège.

4.1.Limitation à l'obtention d'un champ de pétrole

Si la vie est apparue sur terre il y a au moins 3,5 milliards d'années, l'abondance de la matière organique n'existe que depuis 500 à 600 Millions d'années. Il devient donc pratiquement inutile de rechercher du pétrole dans des roches qui sont plus vieilles.

4.2.Limitation à l'obtention d'un champ de charbon

Le charbon se forme lui aussi à partir de la matière organique, mais pas n'importe laquelle. Si les pétroles se forment à partir de la matière organique déposée dans les océans, les charbons eux se forment à partir des végétaux terrestres qui s'accumulent dans les zones anoxiques, comme les grands marécages. C'est d'ailleurs là une limitation au développement de dépôts de charbon. Les végétaux terrestres ne sont apparus en abondance qu'il y a quelques 360 millions d'années (Ma). Inutile de chercher dans des roches plus vieilles que cet âge. Les charbons sont

particulièrement abondants dans les couches de la période Carbonifère, c'est-à-dire cette période géologique qui se situe entre -360 et -285 Ma.

4.3.Stratégies d'exploration

La stratégie d'exploration fait appel à plusieurs secteurs de la géologie et de la géophysique (*Cossé, 1988*) :

- La cartographie géologique de surface pour déterminer les types de roches et le style structural ;
- La paléontologie et la stratigraphie pour bien établir l'âge et la succession des couches sédimentaires ;
- La sédimentologie qui permet de cerner la nature des anciens milieux de dépôt et d'évaluer le potentiel en roches-mères et roches-réservoirs ;
- La géochimie minérale pour évaluer l'évolution de la porosité des roches ;
- La géophysique : à partir de l'analyse du comportement d'ondes sismiques provoquées en surface on peut tracer des profils sismiques qui donnent une image de la structure des couches géologiques en sous-surface.

Même après toutes ces études, on ne sait toujours pas s'il y a du pétrole. Le seul test, c'est le forage, une opération qui se chiffre en million(s) de dollars.

Avec ces informations, on comprend plus facilement que l'exploration pétrolière ne soit pas à la portée d'un simple prospecteur, mais qu'elle est faite plutôt par des sociétés et même le plus souvent, par des consortiums de sociétés pétrolières.

TD-2

Question 1 : A partir des informations sur les phénomènes géologiques exposés, indiquer les arguments qui justifient que :

- Le pétrole est une ressource fossile ;
- La formation des nappes d'hydrocarbures exploitables nécessite des conditions particulières ;
- Cette source d'énergie est dite « non renouvelable » ;

Question 2 : Expliquer le rôle important des géologues dans la prospection de gisements d'hydrocarbures exploitables ?

Question 3 : Discuter les enjeux environnementaux d'une exploitation pétrolière ?

Solution**Réponse 1 :**

- « Des “débris” de plancton, des décombres de végétaux, des restes d'animaux morts..., y ont gagné lentement les abysses, plus ou moins dégradés par des bactéries ».

Interprétation : Le pétrole résulte d'un processus de fossilisation du plancton et autres débris animaux et végétaux morts en milieu marin.

- La formation du pétrole nécessite :
 - o Des eaux pauvres en oxygène ;
 - o Une profondeur entre 1000 et 3 500 mètres (conditions de température et de pression) ;
 - o Des roches avec des propriétés : une roche mère relativement imperméable, une roche réservoir plus perméable ; un piégeage par le biais d'une roche couverture, imperméable.

Interprétation : Les conditions d'obtention du pétrole sont particulières : conditions physico-chimiques lors de la sédimentation, profondeur / température / pression, et une nature et disposition des roches sédimentaires.

- La formation du pétrole nécessite de nombreuses étapes successives : sédimentation, transformation (roche mère), migration, piégeage (roches réservoir et couverture) ;

Interprétation : Il s'agit d'un processus long, plusieurs millions d'années lors des trois étapes principales. A l'échelle humaine (quelques dizaines d'années) le pétrole est une ressource qui n'est donc pas renouvelable.

Réponse 2 :

- Etude des formations géologiques : recherche de roches sédimentaires à certaines profondeurs et de nature données, ayant connu des conditions de formation propices à la formation des hydrocarbures.

Interprétation : Etude de terrain, de cartes géologiques, d'échantillons de roches (carottages)

- Les 4 types de pièges indiquent que les géologues s'intéressent à la disposition des couches de roches les unes par rapport aux autres.

Les géophysiciens à l'aide de la sismique réflexion repèrent les différences de nature entre les roches.

Etude de tomographie sismique.

Interprétation : Les géologues ont donc à repérer ces différents types de structures pour localiser un réservoir potentiel.

Afin d'exploiter les nappes, les géologues doivent aussi évaluer la qualité, l'extension et la profondeur de la nappe. Les réflecteurs permettent de repérer la roche de couverture et la variation des vitesses sismiques permet de matérialiser la présence et le volume des hydrocarbures.

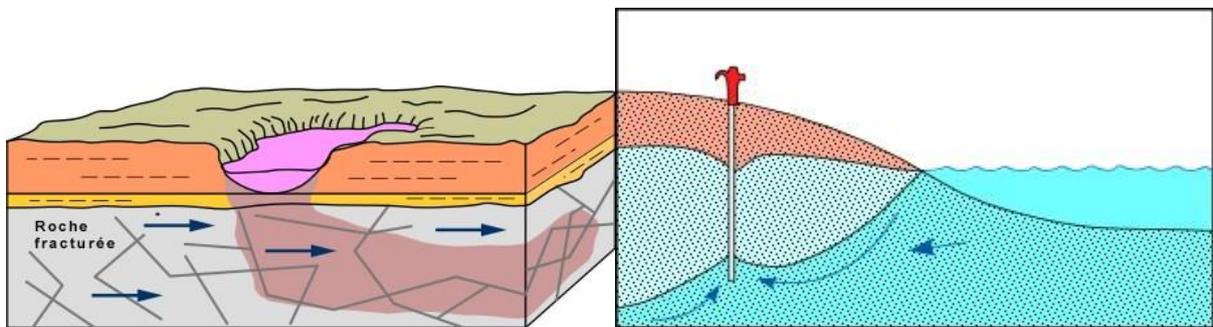
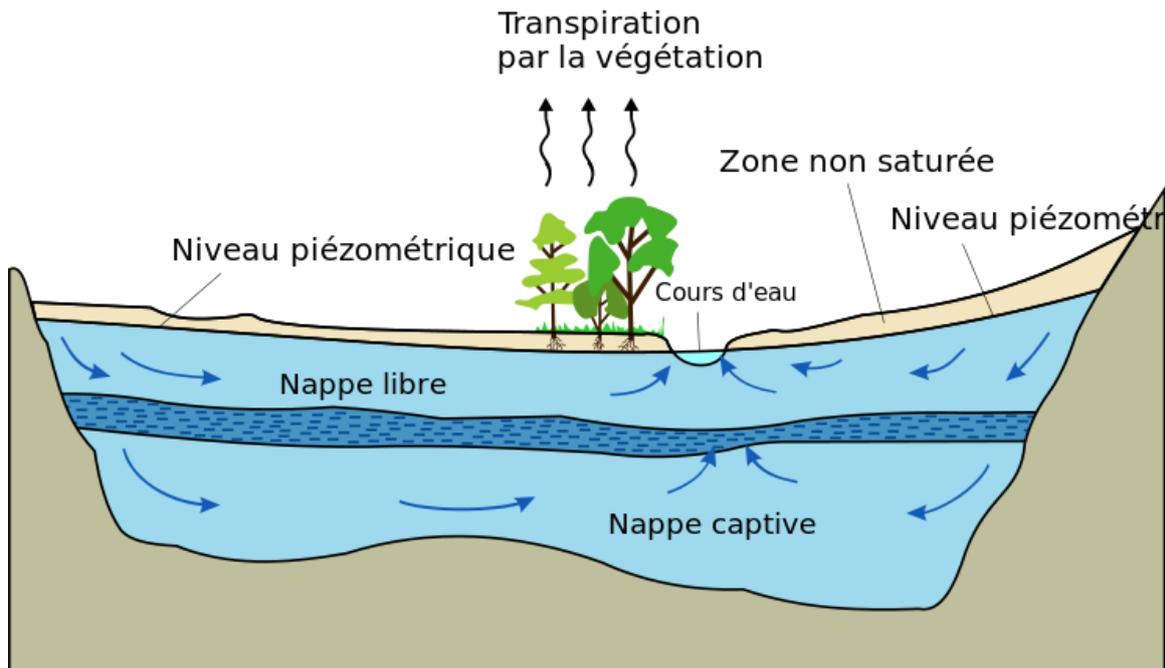
Réponse 3 :

- Depuis l'ère industrielle, augmentation des émissions de CO₂ : de 283 à 380 ppmv, avec une inflexion marquée depuis 1950
- Le CO₂ représente 70% des gaz à effet de serre émis par les activités humaines
- Les énergies fossiles émettent beaucoup de CO₂ : dont 830 Kg par TEP pour le pétrole. C'est moins que le charbon qui est le plus gros émetteur de CO₂ (1123 kg) mais plus que l'ensemble des énergies dites renouvelables (solaire 316 + éolien 32 + nucléaire 19 = 367 kg)

Interprétation :

Le taux de CO₂ ne cesse d'augmenter depuis la révolution industrielle avec une accélération depuis les années 1950. Cette augmentation est liée aux activités humaines et contribue à l'effet de serre (réchauffement climatique). Cette augmentation est liée à l'utilisation massive d'énergies fossiles : le charbon dans un premier temps puis le pétrole

Hydrogéologie



A l'issue de ce chapitre l'apprenant sera capable à maîtriser :

- *Le cycle de l'eau, le bassin hydrologique, le bassin hydrogéologique et l'aquifère ;*
- *L'eau dans la roche ;*
- *Les caractéristiques hydrogéologiques des nappes ;*
- *L'hydrothermalisme ; Les terrains karstiques ;*
- *La contamination des nappes phréatiques.*

1. Cycle global de l'eau à la surface de la terre

Sur Terre, l'eau coexiste en trois phases : vapeur, liquide et solide. Le cycle de l'eau est un système en boucle fermée (déplacement des particules d'eau sous deux états vapeur et liquide), sans point de départ spécifique, schématisé par le chemin que les molécules d'eau parcourent entre les différents réservoirs (atmosphère, hydrosphère, biosphère et lithosphère), grâce aux processus d'évaporation, de condensation, de précipitation et d'écoulement.

La vapeur d'eau s'élève dans l'atmosphère ou elle se condense en nuages, lesquels engendrent les précipitations **P**, leur volume est de 577 000 km³/an (égal à celui de l'évaporation).

Globalement, environ 61% de l'eau des précipitations s'évapore, 16% s'écoule en surface et rejoint les cours d'eau et 23% s'infiltrate et alimente les nappes phréatiques (Fig. III 1).

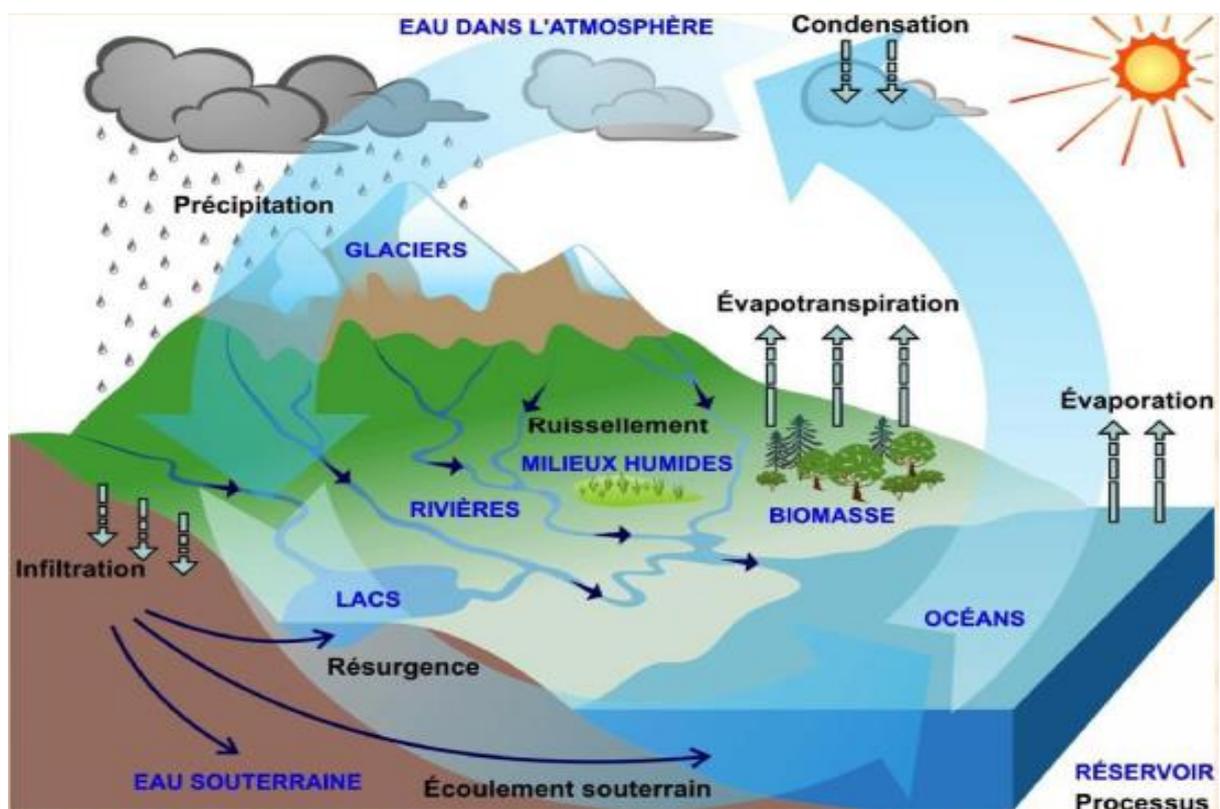


Figure III 1. Cycle global de l'eau

La Terre est recouverte de plus de 70% d'eau. On estime que les océans en contiennent de 95 à 98% (UNESCO-WWAP 2006), les 2 à 5 % restant sont répartis entre les autres grands réservoirs et constituent les seules réserves d'eau douce mondiale. De cette proportion, une grande partie est stockée dans les glaciers (près de 70%), mais cette eau est difficilement disponible pour répondre aux besoins en eau potable. Les lacs et les rivières ne représentent qu'une infime partie de l'eau douce disponible (moins de 1 %), tandis que l'eau souterraine est beaucoup plus abondante (environ 30 %). Ajoutant l'atmosphère (environ 0,03%) (Fig. III 2).

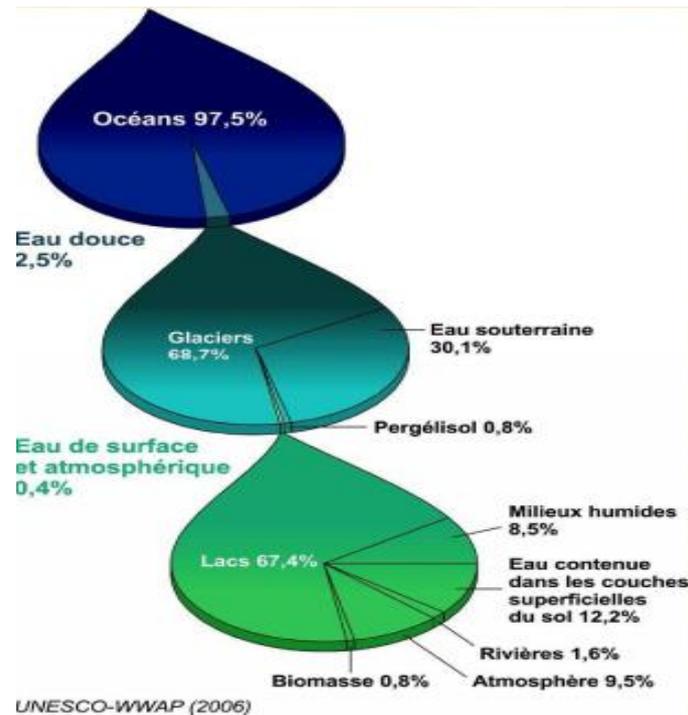


Figure III 2. L'eau sur terre

2. Bassin hydrologique et hydrogéologique

Le bassin hydrologique est limité par les lignes de crêtes topographiques, délimitant le bassin versant d'un cours d'eau et de ses affluents. Par contre le bassin hydrogéologique c'est la fraction de l'espace du bassin hydrologique située sous la surface du sol. C'est le domaine des eaux souterraines (Fig. III 3).

2.1. Aquifère

Il est identifié par la géologie, c'est l'unité de domaine d'étude des eaux souterraines. Le bassin hydrogéologique est constitué d'un ou de plusieurs aquifères (*De Marsily, 2004*).

L'aquifère est alimenté par l'infiltration efficace (IE). C'est la quantité d'eau qui parvient à la surface de la nappe (Au cours de son trajet, entre la surface du sol et la surface de la nappe, l'eau d'infiltration subit des pertes par évapotranspiration).

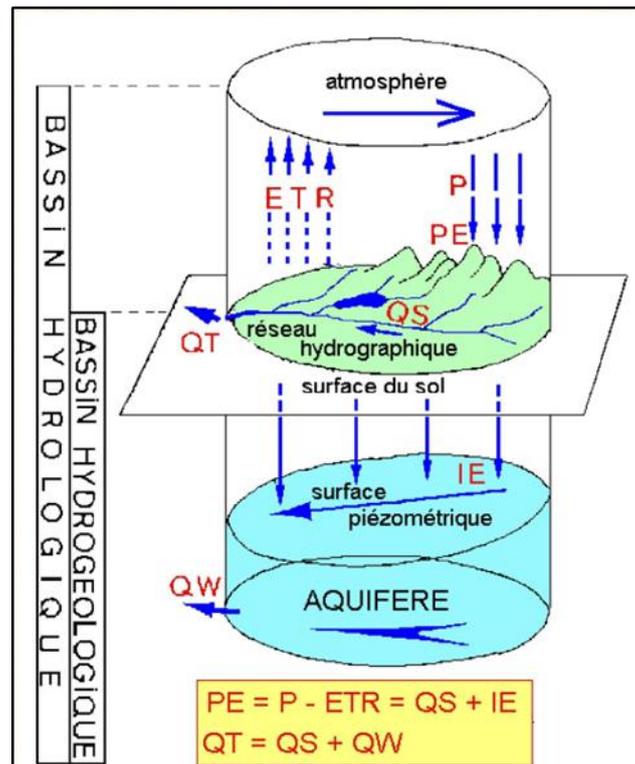


Figure III 3. Bassin hydrologique et hydrogéologique, ainsi que les termes de bilan

3. Différents types d'eau dans une roche

Au voisinage d'un grain, dans un aquifère, il existe deux types d'eau (Fig. III 4) :

- Eau gravitaire : est la fraction de l'eau souterraine libre soumise à la seule force de gravité. C'est elle qui circule dans un aquifère et alimente les exutoires. Son volume dépend de la granulométrie de l'échantillon : il est le plus grand pour des grains grossiers (il y a 3 fois plus d'eau gravitaire dans un gravier que dans un sable fin).
- Eau de rétention : est la fraction de l'eau maintenue dans les vides et la surface des grains par des forces supérieures à celle de la gravité. Elle n'est pas mobilisable. Les forces d'attraction moléculaires, consécutives de la polarité de la molécule d'eau, peuvent atteindre 200 000 fois celle de la gravité. On distingue :
 - Eau adsorbée : elle forme un mince film autour des grains, d'une épaisseur de l'ordre du dixième de micron. Sa quantité augmente en fonction inverse de la granulométrie (Sables grossiers 2-5 %, Sables fins 10-15 %, Argiles 40-50 %)
 - Eau de pelliculaire : C'est une couche d'environ 1 micron d'épaisseur qui tapisse les cavités délimitées par les grains. Elle est moins fortement liée.

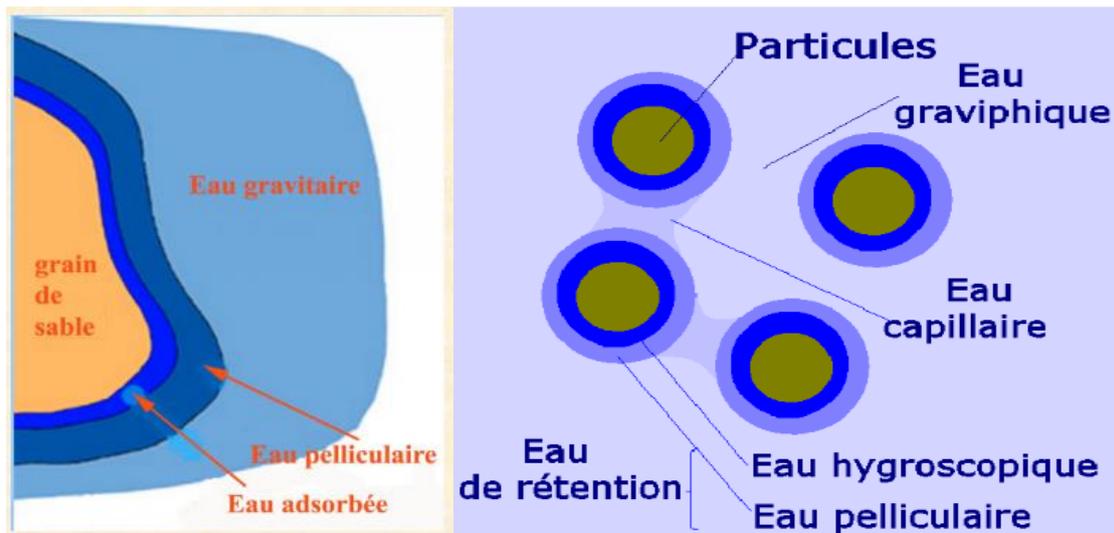


Figure III 4. L'eau dans la roche

4. Notions de porosité

La porosité efficace est le rapport du volume d'eau gravitaire au volume total de la roche saturée en eau. Porosité efficace (ne) (%) = volume eau gravitaire / volume total

Tableau III 1. Porosité efficace de quelques roches

Roche	Porosité totale de la roche (%)	Porosité effective de la roche (%)
Sables et graviers	20 à 40 %	15 à 25 %
Sables fins	30 à 35 %	10 à 15 %
Grès	5 à 25 %	2 à 15 %
Craie	10 à 40 %	1 à 5 %
Calcaire massif fissuré	1 à 10 %	1 à 5 %
Argiles	40 à 60 %	1 à 2 %
Schistes	1 à 10 %	0,1 à 0,2 %
Granite fissuré	0,1 à 5 %	0,1 à 0,2 %

5. La nappe phréatique et la nappe perchée

Quand on parle d'eaux souterraines, on se réfère, en pratique, aux eaux qui se trouvent dans la partie superficielle de la croûte, quelques centaines de mètres au maximum, celles qui sont propres à notre consommation. Plus on s'enfonce dans la croûte, plus l'eau devient riche en divers sels minéraux et métaux, ce qui la rend impropre à la consommation.

Si les matériaux du sous-sol sont perméables, les eaux de pluie s'infiltrent et finissent par s'accumuler à partir d'un certain niveau, ce qui délimite deux grandes zones en ce qui concerne les eaux souterraines : la nappe phréatique, une zone où toutes les cavités (pores du sédiment, fractures des roches, cavernes, etc.) sont saturées en eau ; la zone vadose, une zone où les cavités contiennent principalement de l'air avec un peu d'eau.

Il peut arriver qu'il y ait localement dans du matériel aquifère, une zone de matériaux aquicludes, comme une couche d'argile par exemple. Cette couche forme une barrière à l'eau et permet l'accumulation d'une lentille d'eau dans la zone vadose. On parle alors de nappe perchée. C'est par exemple ce genre de nappe qui peut donner naissance à une source (Fig. III 5).

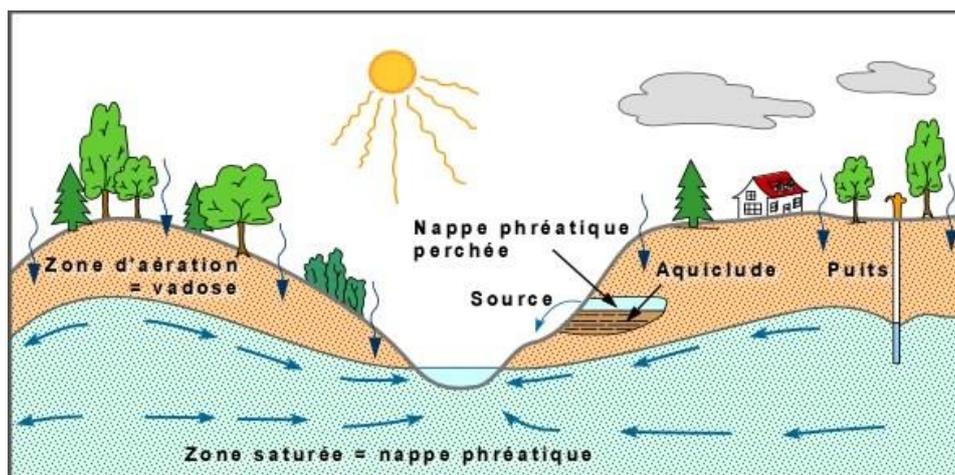


Figure III 5. Nappe phréatique perchée (Castany, 1982)

6. Identification géologique et hydrogéologique d'un aquifère

Un aquifère est un système hydrologique, il est identifié par un domaine d'espace souterrain fini et continu appelé : réservoir.

Le réservoir est caractérisé par trois ensembles de données :

- Sa configuration ou enveloppe : décrivant son contour, ses dimensions volume et la nature de ses limites géologiques ;
- Sa localisation dans le sous-sol par l'altitude et la profondeur des limites géologiques ;
- Sa structure : déterminée par la lithologie et l'analyse structurale. Elle est identifiée par les caractéristiques physiques (granulométrie, faciès, ...), géochimiques (sels solubles) et structurales (déformations, fissuration) des matériaux qui constituent le réservoir.

6.1. Identification des formations hydrogéologiques

Une formation hydrogéologique est une formation litho-stratigraphique ayant des fonctions globales vis-à-vis du stockage et de l'écoulement de l'eau souterraine.

Trois ordres de grandeurs sont à considérer :

- Une formation hydrogéologique : identifiant un aquifère, un toit et un substratum ;
- La combinaison de formations hydrogéologiques (perméables et semi-perméables) identifiant un aquifère multicouches ;
- La combinaison de nombreuses formations hydrogéologiques constituant une structure hydrogéologique.

La caractéristique essentielle d'une formation hydrogéologique est son degré de perméabilité (aptitude d'un réservoir à conduire l'écoulement de l'eau).

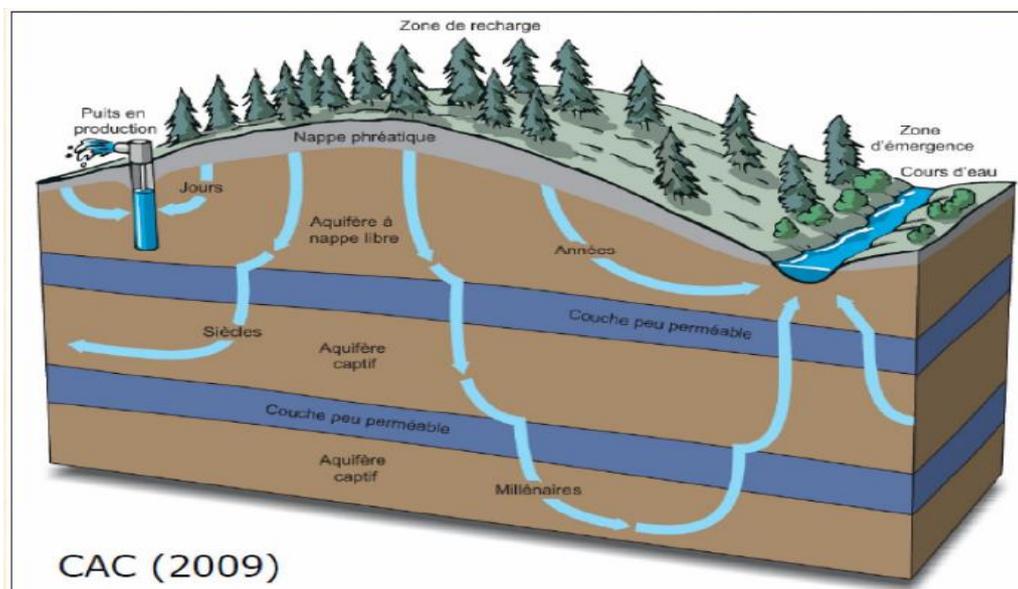


Figure III 6. Structure hydrogéologique composée par plusieurs aquifères

Formations hydrogéologiques perméables sont constituées par des matériaux ayant la propriété de se laisser traverser par l'eau à des vitesses appréciables (qlqs m à des milliers de m/an) sous l'impulsion de différences d'altitudes ou pente de la nappe appelés gradients (Fig. III 7)

Exemples : graviers, alluvions, sables gros, moyens, calcaires fissurés

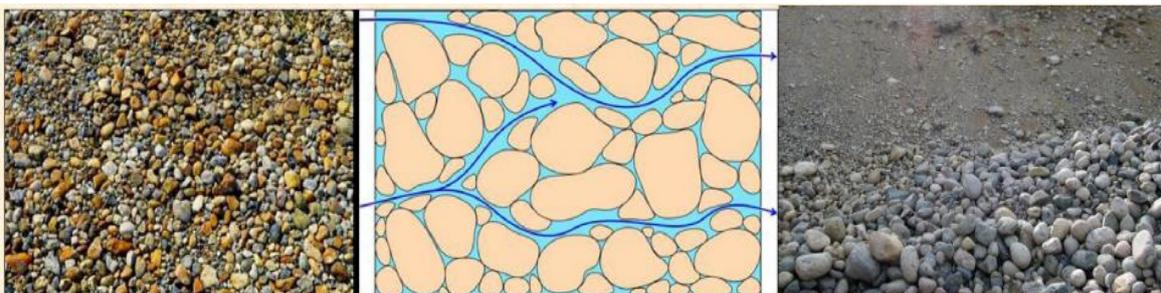


Figure III 7. Formations hydrogéologiques perméables

Formations hydrogéologiques imperméables, imposant les limites géologiques des aquifères : les vitesses d'écoulement de l'eau souterraine, dans certains matériaux, sont faibles (qlqs mm/an).

Exemples : silts, argiles, marnes schistes, ... Exemples : silts, argiles, marnes schistes, ...

Formations hydrogéologiques semi-perméables, à l'origine de l'aquifère multicouche :

Les sables fins, les sables argileux, de très faible perméabilité permettent dans des conditions hydrodynamiques favorables, les échanges verticaux ascendants ou descendant entre aquifères superposés.

Exemple : les nappes de la Mitidja (marnes jaunes sont semi-perméables)

6.2. Identification hydrodynamique de l'aquifère

Un aquifère est une formation géologique perméable permettant l'écoulement significatif d'une nappe d'eau souterraine et le captage de quantités d'eau appréciable, par des moyens économiques.

6.2.1. Configuration de l'aquifère (types hydrodynamique)

6.2.1.1. Aquifère à nappe libre

L'eau souterraine est en contact direct avec l'atmosphère (Pression atmosphérique). Le niveau de la nappe dans la formation hydrogéologique peut s'élever ou s'abaisser librement (fluctuation) d'où le nom de l'aquifère à nappe libre (Fig. III 8).

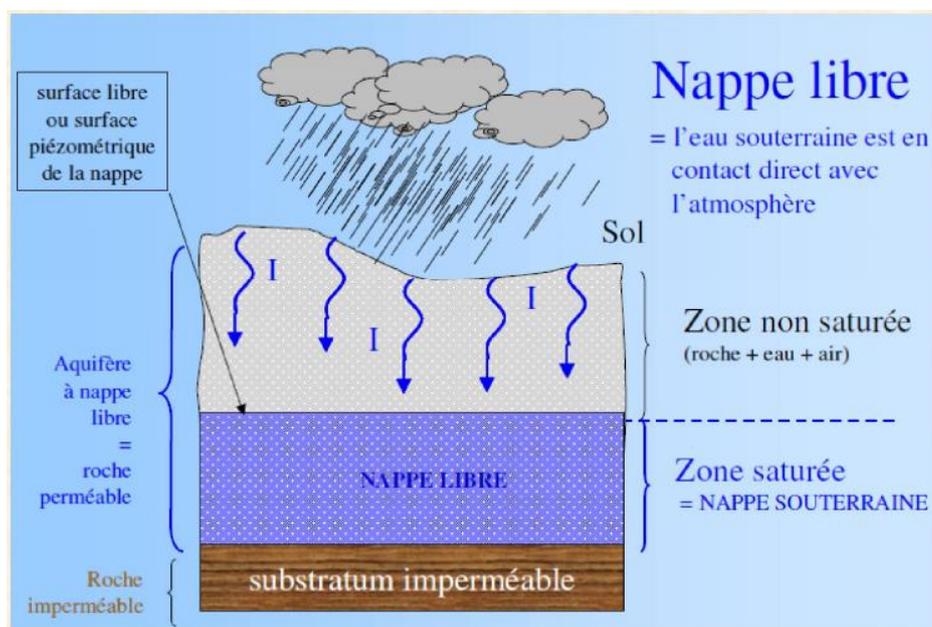


Figure III 8. Aquifère à nappe libre

6.2.1.2. Aquifère à nappe captive

Les eaux souterraines sont emprisonnées dans la formation hydrogéologique perméable, entre deux formations imperméables. Le substratum à la base et le toit au sommet. En profondeur, l'aquifère subit une pression de haut en bas égale au poids de la colonne de terrain qui le surmonte jusqu'à la surface du sol (Fig. III 9).

Lorsqu'un sondage perce le toit de l'aquifère, il y'a une décompression et l'eau est expulsée. Son niveau se stabilise à une altitude qui présente le niveau piézométrique (H).

Les eaux souterraines sont dites ascendantes. Si le niveau se situe au-dessus de la surface du sol, l'eau jaillit naturellement, c'est : l'artésianisme.

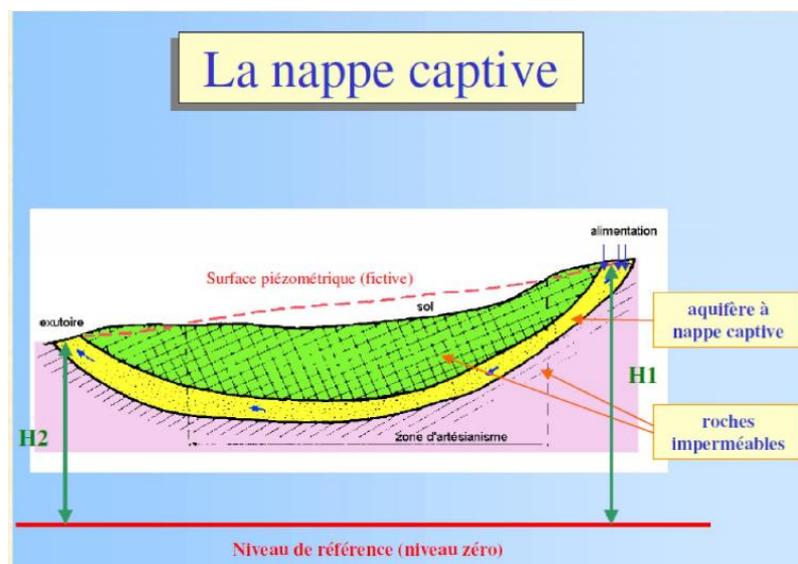


Figure III 9. Aquifère à nappe captive

Tableau III 2. Différence entre nappe libre et captive

Nappe libre	Nappe captive
<ul style="list-style-type: none"> - Contact direct avec l'atmosphère. - Recharge (alimentation) rapide. - Pas de protection naturelle face aux pollutions de surface 	<ul style="list-style-type: none"> - Pas de contact direct avec l'atmosphère. - Recharge (alimentation) lente. - Protection naturelle face aux pollutions. - Eau généralement fortement minéralisée (non potable ?).

6.2.1.3. Aquifère à nappe semi-captive

Le toit ou le substratum (ou même les deux) de l'aquifère sont constitués par une formation hydrogéologique semi-perméable. Celle-ci permet des échanges d'eau avec l'aquifère superposé ou sous-jacent, appelé : drainance.

7. Caractéristiques physiques du réservoir

L'eau souterraine mobile s'emmagasine et circule dans les vides du réservoir, d'où l'importance de leur étude. L'étude morphologique des vides portes sur leur nature, leur forme et leurs dimensions.

Deux grands types de vides, pores et fissures, caractérisent respectivement : le milieu poreux et le milieu fissuré (Tab. III 3).

7.1.Milieu poreux

Les pores sont des vides de forme plus au moins sphérique, de petites dimensions, situés entre les particules solides (grains). Le diamètre des grains des roches meubles perméables varie de 0,06 à 16mm. Pour les argiles, milieu imperméable le diamètre varie de 0,1 à 0,001mm.

Les pores communiquent entre eux dans le sens de l'écoulement de l'eau souterraine, permettant le déplacement des particules d'eau (eau gravitaire). Le milieu poreux est un milieu continu.

7.2.Milieu fissuré

Les fissures sont des fentes de forme allongée, à ouverture plus ou moins large. Elles sont classées suivant leurs dimensions en deux types (Fig. III 10) :

- Les microfissures : caractérisées par une ouverture de quelques dixièmes de millimètres et une longueur de l'ordre métrique à décimétrique. Son rôle hydrodynamique est comparable à celui des pores interconnectés du milieu poreux continu.
- Les macrofissures : d'une ouverture supérieure à quelques millimètres et une longueur de l'ordre hectométrique à kilométrique. Le milieu est discontinu.



Figure III 10. Aquifère à porosité de fissures

Tableau III 3. Caractéristiques physiques des réservoirs

Echelles de référence	Types de vides		Types de milieux	
Microscopique Ordre de 1/10 à 1mm	Pores	Intercristaux Intergrains	Poreux	CONTINU
	Microfissures	Diaclases Joints Schistosité	Fissuré	
Macroscopique Ordre supérieur à quelques mm	Macrofissures	Macrofissures Chenaux Cavités - Karst		DISCONTINU

8. Approvisionnement en eau potable

Elle se fait par deux types de puits : le puits de surface et le puits artésien.

On appelle puits de surface un puits qui s'approvisionne directement dans la nappe phréatique. Le pompage dans un puits de surface a pour effet de former autour du puits un cône de dépression. Un excès de pompage abaissera le niveau phréatique et pourra contribuer à assécher d'autres puits avoisinants (Fig. III 11).

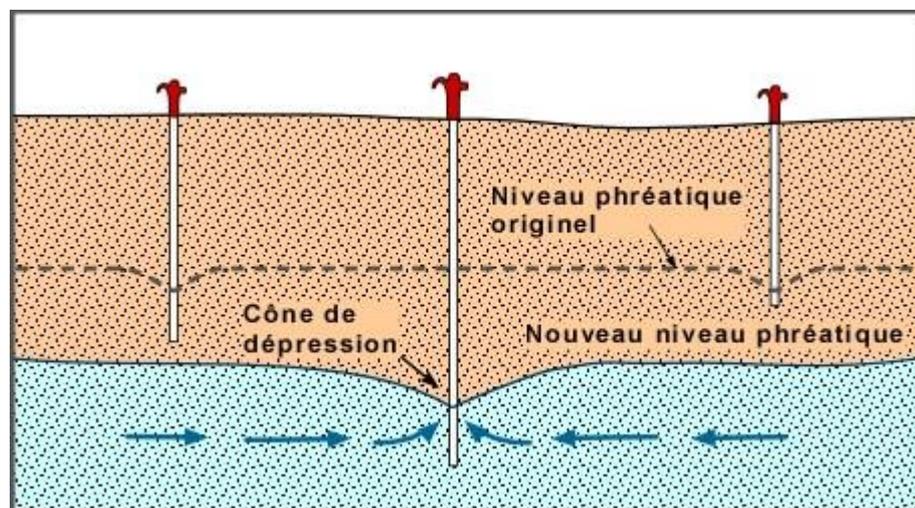


Figure III 11. Puits de surface

Le puits artésien est un puits qui s'approvisionne dans un aquifère confiné par un aquiclude et mis sous pression à la faveur d'une zone de recharge. Le schéma qui suit montre que la recharge en eau de l'aquifère se fait à partir de la surface du terrain, créant dans l'aquifère une pression croissante avec la profondeur (Fig. III 12).

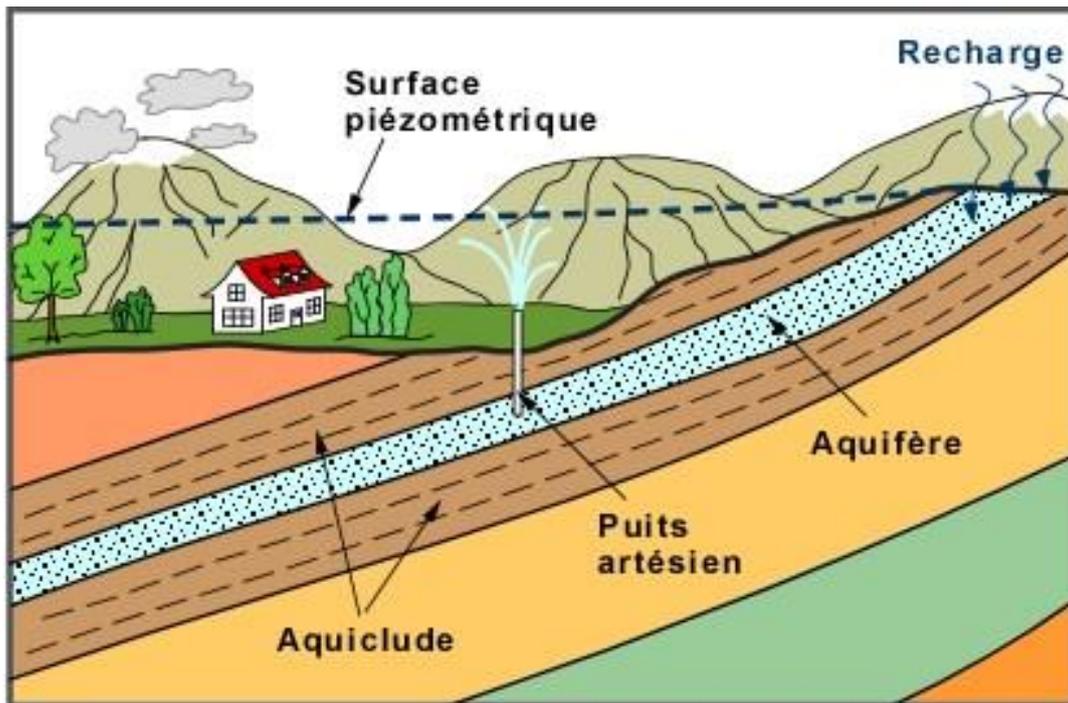


Figure III 12. Puits artésien

9. La contamination d'une nappe phréatique et mode d'enfouissement des polluants

L'enfouissement des substances polluantes doit tenir compte de la nature des terrains (Fig. III 13). Ce postulat qui semble pourtant des plus évidents n'est pas toujours pris en considération. Par exemple :

- Un enfouissement sur des matériaux poreux comme les sables et les graviers ne peut conduire qu'à une dispersion des contaminants sur de grandes distances, lentement mais sûrement ;
- On croit généralement que l'enfouissement sur le roc solide est un gage de sécurité. La roche est souvent fracturée ; elle peut alors être très perméable et constituer un excellent aquifère ;
- La roche de fond n'est pas toujours homogène. Même si l'ensemble des couches apparaît à première vue non fracturé et imperméable, il faut bien s'assurer qu'il n'y a pas une ou des couches qui soient perméables et qui pourrait agir comme transporteurs de contaminants.

Un enfouissement dans les argiles offre beaucoup moins de risques, car ce genre de sédiment est passablement imperméable. Il faut bien s'assurer cependant que la couche d'argile soit suffisamment épaisse pour que l'enfouissement n'atteigne pas des couches sous-jacentes qui seraient perméables (Olivier, 2015).

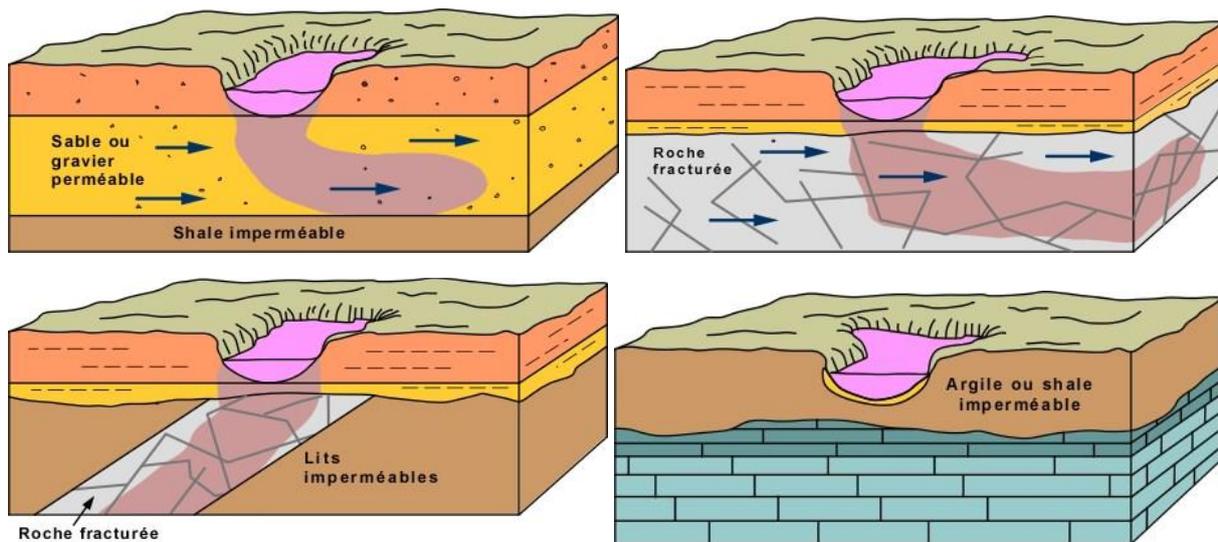


Figure III 13. L'enfouissement des substances polluantes

Un autre type de contamination est fréquent dans les régions côtières. Il s'agit de la contamination des puits par l'eau salée (Trabelsi et al., 2005). En bord de mer, dans les régions de plaines surtout, les eaux salées plus denses que les eaux douces potables s'infiltrent sous ces dernières jusqu'à une certaine distance à l'intérieur du continent. L'eau douce "flotte" en quelque sorte sur l'eau salée (Fig. III 14a).

Le pompage de l'eau douce entraîne la création normale d'un cône de dépression à la surface de la nappe phréatique ; en réaction à ce cône de dépression, il se forme un cône inverse sous la lentille pour rééquilibrer les masses de densités différentes (Fig. III 14b).

Un surpompage entraînera un abaissement du niveau phréatique et, en réaction, une remontée de la surface des eaux marines phréatique. Un puits qui pendant un certain temps a pompé de l'eau douce peut subitement se mettre à pomper de l'eau salée (Fig. III 14c).

Une montée du niveau marin s'accompagnera d'une montée de la nappe phréatique marine sous la plaine littorale, entraînant le pompage d'eau salée dans les puits. C'est là une situation qui risque de se produire avec la montée prévue du niveau des mers reliée au réchauffement climatique en cours et qui peut s'avérer particulièrement désastreuse dans les zones deltaïques à forte densité de population (Fig. III 14d)

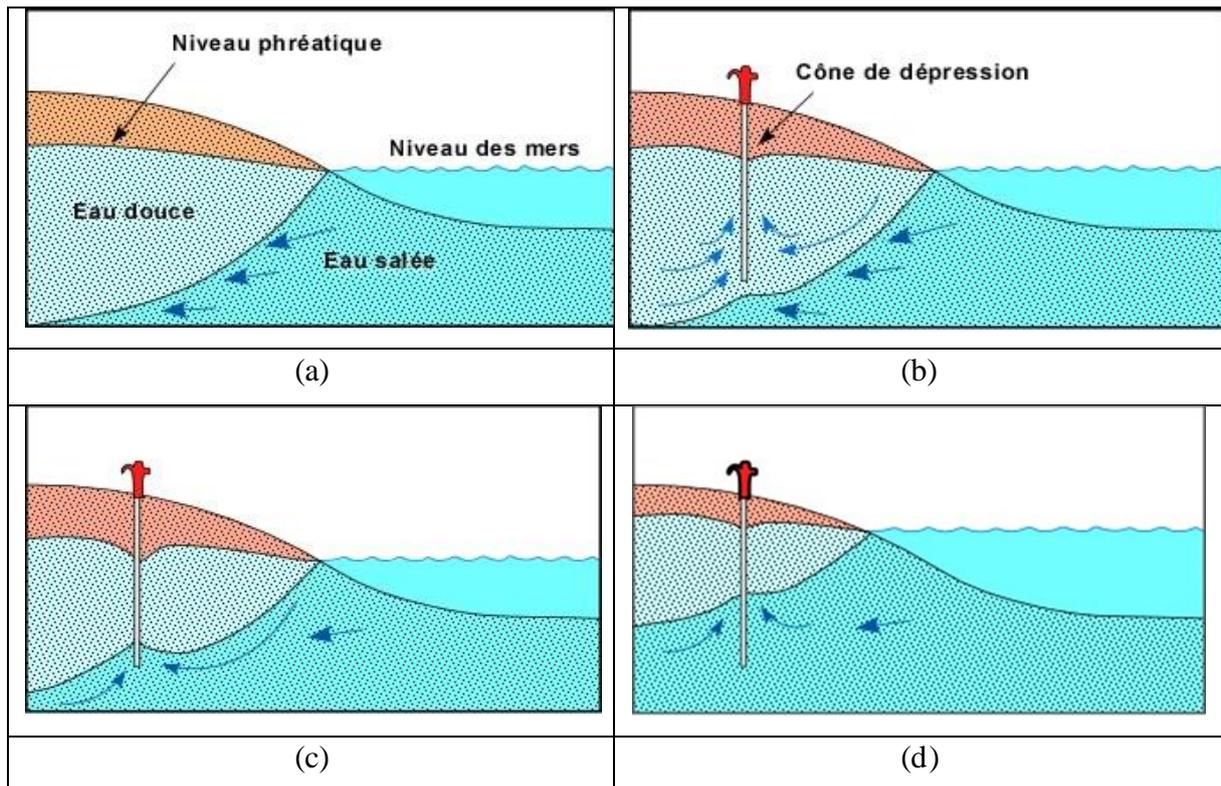


Figure III 14. Le biseau salé - douce

10. Les terrains karstiques

Les eaux souterraines modèlent les terrains calcaires d'une façon bien particulière : les eaux de pluies dont sont issues les eaux souterraines sont naturellement acides et dissolvent le calcaire en circulant dans les fractures de la roche, créant tout un réseau de cavernes (Delannoy, 1999). Ces terrains calcaires sont appelés des terrains karstiques (du mot karst, terrains calcaires de Yougoslavie). L'évolution des terrains karstiques est la suivante (Fig. III 15) :

- Pour un terrain donné, le niveau de la nappe phréatique correspond en gros au niveau des cours d'eau. Comme ces eaux phréatiques sont acides, elles développent tout un réseau de cavités en s'infiltrant le long des moindres fractures et en les agrandissant par dissolution ;
- Avec le creusement des cours d'eau qui tendent vers leur niveau de base, il y aura abaissement progressif du niveau de la nappe phréatique. Le réseau de cavités progresse en profondeur au même rythme, développant un beau réseau de cavernes ;
- Les terrains vont devenir un véritable gryère avec, par exemple, des effondrements qu'on appelle des dolines et qui rendent ces terrains souvent dangereux ;
- Les terrains calcaires font certes la joie des spéléologues en présentant parfois des cathédrales de stalactites, stalagmites, draperies et dépôts de cavernes de toutes sortes,

mais ils constituent de véritables dangers pour la construction. Le terme général de spéléothèmes est utilisé pour tous ces dépôts.

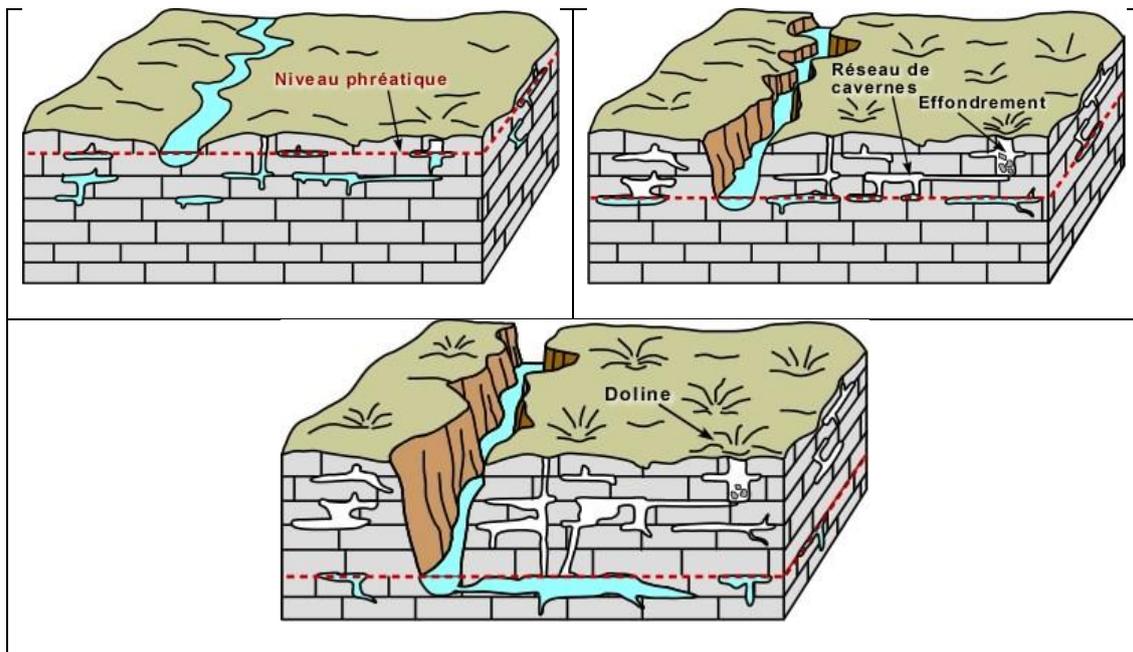


Figure III 15. Développement des terrains karstiques

11. L'hydrothermalisme

On sait que la température du sous-sol augmente avec la profondeur. Les mineurs savent bien qu'il fait plus chaud à mesure que l'on descend dans la mine. Cette augmentation de température est de l'ordre de 30°C par kilomètre dans la plupart des terrains où il n'y a pas eu de magmatisme récent : c'est ce que l'on appelle le gradient géothermique. Dans les terrains qui ont connu récemment du magmatisme (volcanisme, par exemple), le gradient géothermique est beaucoup plus élevé que $30^{\circ}\text{C}/\text{km}$. Des eaux chaudes à très chaudes peuvent remonter à la surface, donnant lieu à de l'hydrothermalisme.

Un bon exemple d'hydrothermalisme nous est donné par les geysers et sources chaudes du Parc Yellowstone aux U.S.A. Dans ce parc national américain (nord-ouest du Wyoming), on peut observer les manifestations spectaculaires de l'hydrothermalisme, tels les geysers, les sources chaudes, les lacs de boues chaudes et tous les dépôts qui y sont associés. Cette portion de la plaque continentale nord-américaine se situe au-dessus d'un point chaud qui a produit du volcanisme intraplaque il y a à peine quelques centaines de milliers d'années. Aujourd'hui, le magma se refroidit et la chaleur se dissipe dans la croûte continentale, créant un flux de chaleur constant, comme l'indique le schéma qui suit (Fig. III 16).

Les eaux de surface (Pluie) peuvent s'infiltrer dans les fractures de la croûte, sont réchauffées et comme dans le cas de l'hydrothermalisme des fonds océaniques, elles sont ramenées à la surface grâce à ce flux de chaleur qui établit une cellule de convection.

Les eaux hydrothermales sont acides et produisent énormément de dissolution. Elles créent des réseaux de cavités dans le sous-sol qui est composé par endroits de rhyolite (roche volcanique) et ailleurs de calcaires.

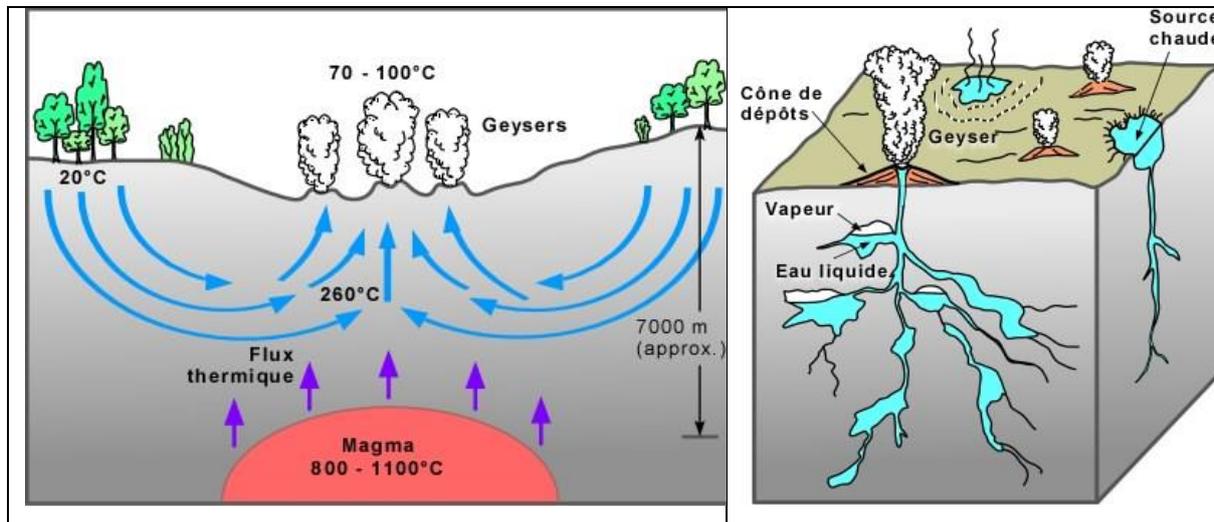


Figure III 16. Geysers et les sources chaudes

Le flux de chaleur chauffe l'eau des cavités qui progressivement passe en vapeur. La pression dans les cavités d'un réseau donné augmente progressivement, comme dans une marmite couverte, jusqu'à ce que, la pression devenant trop élevée, la vapeur soit évacuée subitement, vidant tout le réseau. C'est le geyser. Le cycle recommence avec le remplissage à nouveau des cavités par l'eau qui, chauffée, passe en vapeur, puis explose. C'est le cas du fameux geyser "Old Faithfull" à Yellowstone.

Les eaux des sources hydrothermales et des geysers sont chargées en sels minéraux acquis en profondeur. Avec l'écoulement des eaux en surface, ces sels minéraux précipitent pour former des amoncellements de dépôts siliceux ou calcaires.

Un aspect intéressant de ces sources chaudes est qu'elles constituent une source d'énergie thermique gratuite. Il faut voir cependant qu'elles n'existent en général que dans les régions qui ont connu du magmatisme récent, mais pas exclusivement. Par exemple, dans les Appalaches de Virginie (U.S.A.), il y a des sources chaudes qui proviennent d'eaux qui ont été réchauffées en profondeur uniquement à cause du gradient géothermique ; ces eaux cependant ont des températures à peine plus élevées que celle du corps humain. En Islande, où l'activité magmatique est actuelle, on utilise cette forme d'énergie pour le chauffage de serres, ce qui permet une culture qui serait pratiquement impossible autrement sous un tel climat nordique. Aussi, plusieurs attribuent des vertus thérapeutiques à ces sources chaudes et fréquentent assidûment les thermes.

TD-3

Hydrogéologie (Carte piézométrique)**Carte Piézométrique**

- Piézomètre : tube d'observation du niveau d'eau planté dans le sol.
- Hydro isohypse (synonyme iso pièze) : courbe de même niveau d'eau dans le sous-sol (cas des nappes libres). Plus précisément : courbes de même pression hydrostatique.
- Carte piézométrique : Carte donnant les niveaux d'eau dans le sous-sol.
- Surface piézométrique : niveau d'eau (variable) dans le sous-sol. Généralement tracé le long d'une coupe.
- Axe d'écoulement : flèche pointant vers le bas, en direction de la plus grande pente sur une carte piézométrique.

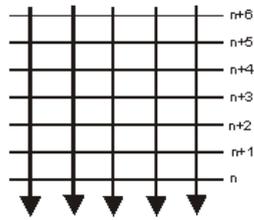
Les axes d'écoulement

Fig. 1a

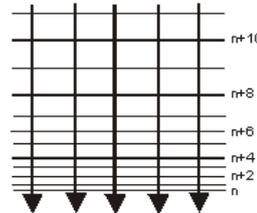


Fig. 1b

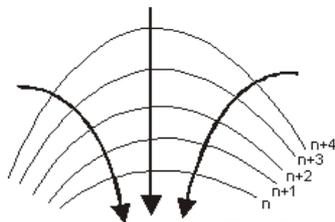


Fig. 2a

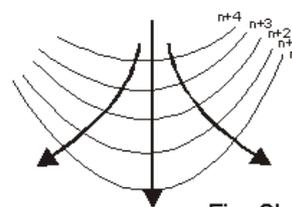


Fig. 2b

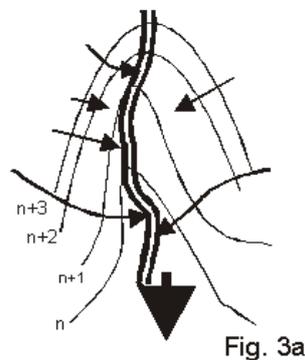


Fig. 3a

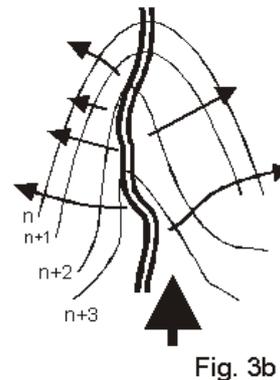
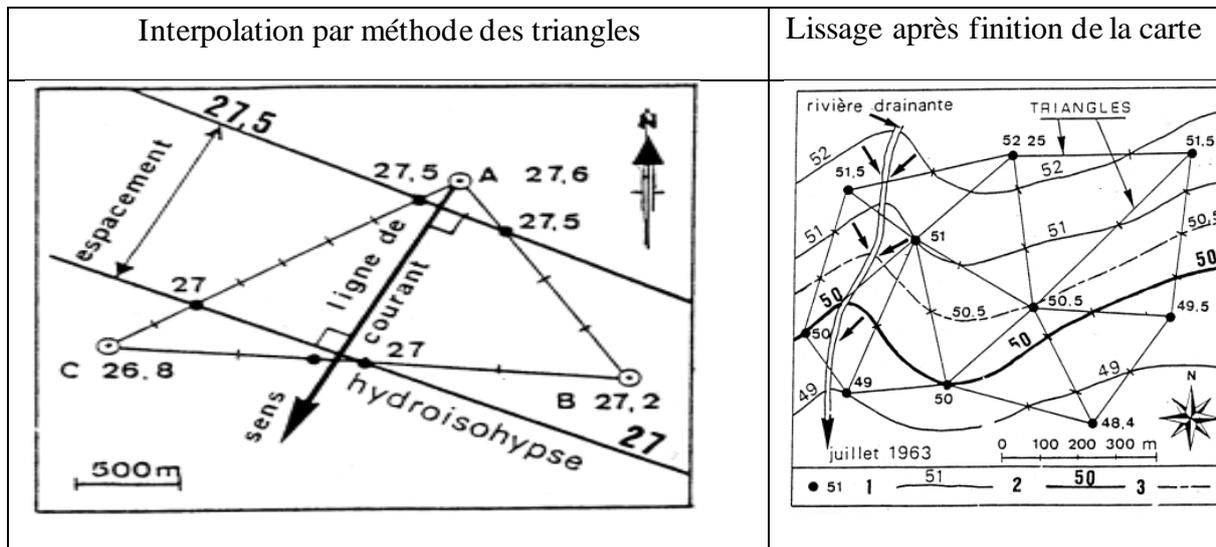
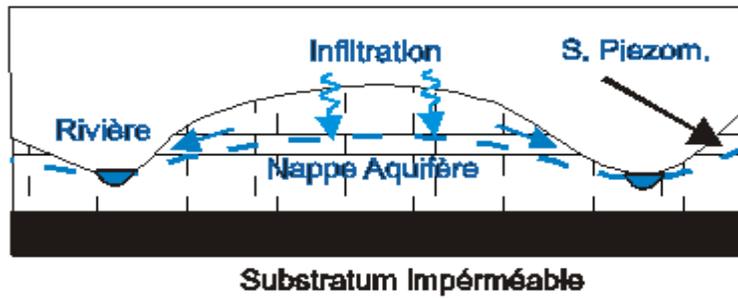
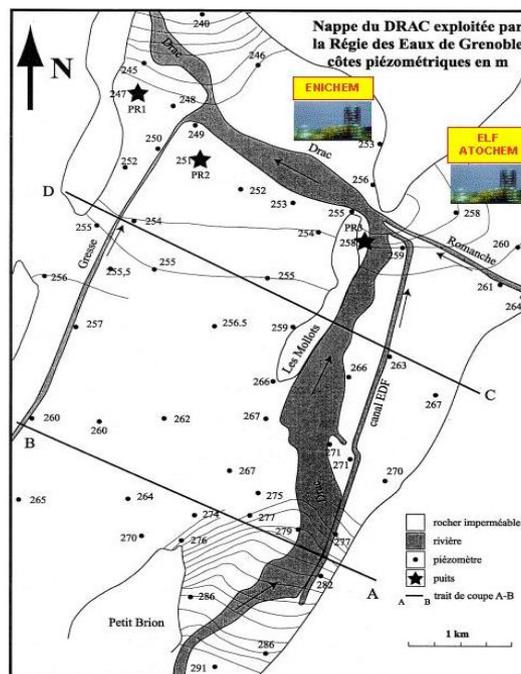


Fig. 3b

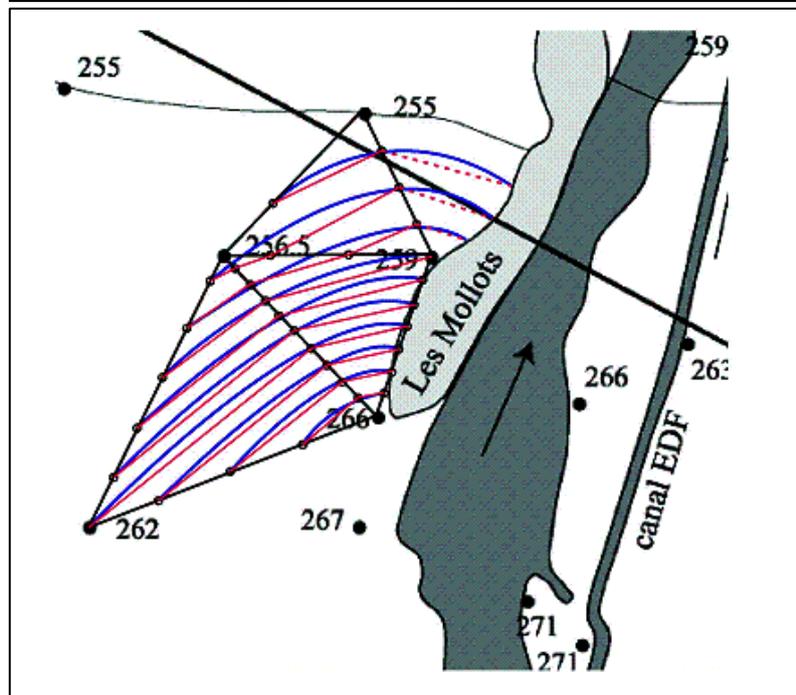
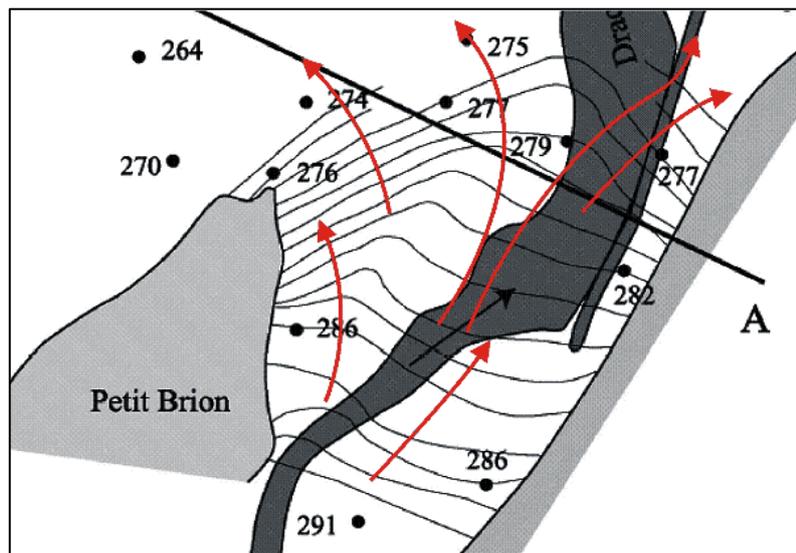


Exercice 1 :

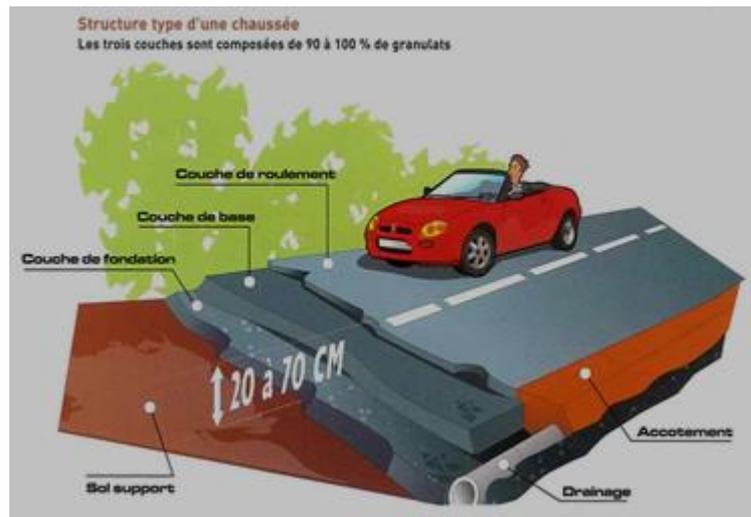
- 1) Placer les axes d'écoulement sur la carte piézométrique ?
- 2) Construire les hydro-isohypses manquantes par méthode de triangulation ?
- 3) Lisser les hydro-isohypses obtenues ; extrapoler vers les murs imperméables ?



Corrections



Géotechnique



Ce chapitre vise à doter les étudiants des connaissances et compétences pour les rendre capable à maîtriser :

- *Les notions de base de la géotechnique ;*
- *La géotechnique routière ;*
- *L'essai permettant de déterminer les paramètres de nature des sols ;*
- *L'essai de détermination des paramètres de compactage ;*
- *Les essais de détermination des paramètres de comportement mécanique.*

1. Qu'est-ce que la géotechnique ?

La Géotechnique est l'ensemble des activités liées aux applications de la Mécanique des Sols, de la Mécanique des Roches et de la Géologie de l'ingénieur. La Mécanique des Sols étudie plus particulièrement le comportement des sols sous leurs aspects résistance et déformabilité.

A partir d'essais de laboratoire et in-situ de plus en plus perfectionnés. La Mécanique des Sols fournit aux constructeurs les données nécessaires pour étudier les ouvrages de génie civil et de bâtiment, et assurer leur stabilité en fonction des sols sur lesquels ils doivent être fondés, ou avec lesquels ils seront construits (barrages en remblais). Ceci tant durant la progression des travaux (grands terrassements) qu'après mise en service des ouvrages (Holtz and Kovacs, 1991).

2. Domaines d'application

La Mécanique des Sols joue un rôle essentiel dans l'acte de construire pour tous les travaux de bâtiment et de génie civil en relation avec les sols ou les mettant en œuvre (Fig. IV 1). Les sols peuvent :

- Supporter les ouvrages : fondations superficielles les fondations profondes ;
- Être supportés murs de soutènement rideaux de palplanches ;
- Constituer l'ouvrage lui-même remblais digues barrages.

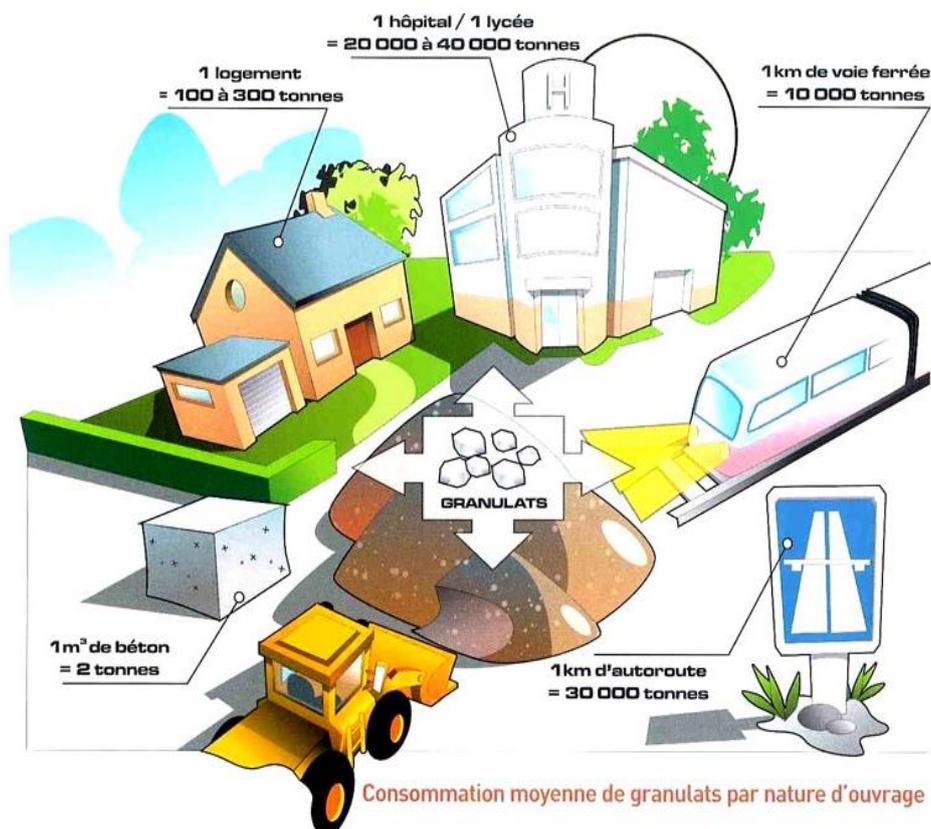


Figure IV 1. Géotechnique et domaine d'application

3. Géotechnique routière

La géotechnique routière est tout simplement l'application de la géotechnique au domaine routier. Elle concerne :

- Les travaux de terrassement (utilisation du sol comme matériaux de construction en déblai/remblai) ;
- Les soutènements et stabilisation de talus ;
- Les fondations des ouvrages d'art ;

Une chaussée est composée de plusieurs couches successives qui doivent répondre à des critères de qualités croissants en partant de la PST (Partie Supérieure des Terrassements) pour remonter jusqu'aux couches de roulements (Fig. IV 2).

L'objectif des différentes couches étant de permettre au sol support de résister aux contraintes liées à la circulation, en fonction de sa portance et des charges auquel on va le soumettre. Chaque couche doit pouvoir supporter les charges des couches supérieures et être suffisamment compactée pour permettre un effet d'enclume lors du compactage (Recordon, 1980).

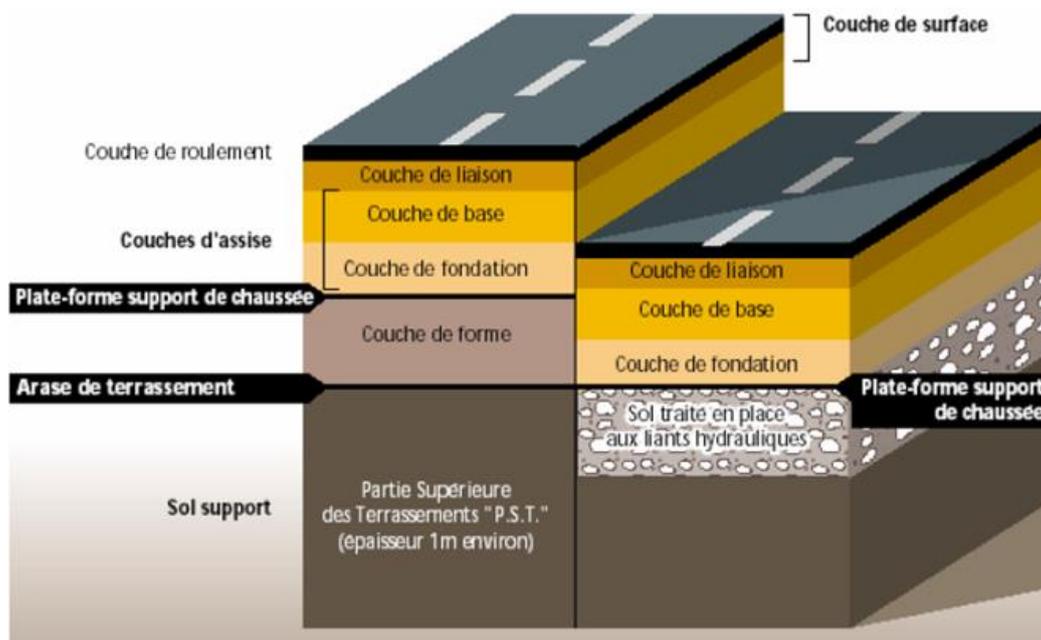


Figure IV 2. Différentes couches de chaussée

3.1. Terrassement

D'une façon générale, tout mouvement de terres (remblai ou déblai) constitue un terrassement. Creuser une fouille, une rigole ou plus généralement modifier le relief du sol représente en soi des terrassements.

- Un terrassement par déblai consiste à enlever des terres initialement en place ;
- Un terrassement par remblai consiste à mettre en place, en général par apport ou dépôt, des terres préalablement prélevées.

Remarque : L'art du terrassement consiste à chaque fois que c'est possible à assurer un équilibre entre déblais et remblais.

- Les travaux de terrassement sont généralement précédés par des opérations d'implantation et de piquetage destinés à matérialiser les mouvements de terres en fonction des nivellements définitifs à obtenir.

Les opérations de terrassement visent également à l'exécution :

- de la préparation des fondations superficielles ou profondes
- D'ouvrages annexes aux bâtiments tels que tous les ouvrages de voirie (routes d'accès aires de stationnement et aires diverses ...)
- D'ouvrages d'infrastructure des réseaux enterrés (canalisations diverses, galeries, regards, etc.

3.2. Compactage

Historiquement, le compactage statique demeure la technique la plus ancienne qui consiste à réduire le volume des vides entre les grains d'un sol. Le compactage est facilité par ajout d'une quantité d'eau, qui, lorsque optimisée, et pour une énergie de compactage donnée, la densité sèche maximale du sol est atteinte (*Bergado et al., 1996*). Le compactage, favorisant un contact plus marqué entre les grains du sol s'accompagne d'une réduction des vides et contribue à l'augmentation de la résistance au cisaillement par le biais du frottement inter granulaire. Cette diminution de volume ne se produit que par l'élimination des vides remplis d'air qui existent dans le sol à son état initial.

Cependant le compactage statique, très pratiqué en surface pour les plateformes routières et corps de chaussées, ne permet qu'une amélioration très limitée en profondeur. Pour cela, le compactage dynamique s'est révélé plus tard comme une technique plus efficace pour stabiliser et densifier les couches de sols pulvérulents situés aussi bien hors nappe que sous la nappe d'eau. Ce procédé consiste à faire chuter, sur une hauteur variant de 15 à 40 m, une très grande masse de 15 à 150 tonnes sur le sol à compacter (*Bergado et al., 1996*).

3.2.1. Facteurs d'influence du compactage.

Parmi les facteurs influençant le compactage on trouve :

- *La teneur en eau* : L'influence de la teneur en eau sur le résultat d'un compactage a été étudiée dès 1933 par l'ingénieur américain Proctor, qui a mis au point l'essai de compactage qui porte son nom.

En effet, un sol 'trop sec' sera le siège de frottements importants entre les grains de sol.

Un sol trop humide par contre sera moins susceptible d'être compacté, car une partie

importante de l'énergie de compactage sera absorbée par l'eau (incompressible) et ne sera donc pas communiquée aux grains de sol.

- *La nature du sol* : Les sols dont la teneur en eau influence peu le compactage sont généralement les meilleurs remblais. En effet, les sables sont très peu sensibles à l'eau en ce qui concerne le compactage, tandis que s'ils contiennent une fraction argileuse, leur courbe s'infléchit de manière importante.
- *Influence de l'énergie de compactage*

3.2.2. Le compactage profond

Le compactage en profondeur des sols grenus est mis en œuvre pour résoudre des problèmes de fondation tels que

- Amélioration de la résistance du sol pour augmenter sa capacité portante, la stabilité de pentes et excavations.
- Augmentation de la raideur du sol pour réduire les tassements totaux et différentiels pouvant être causés par des chargements statiques, cycliques ou dynamiques.
- Réduction des poussées latérales des terres contre les structures de soutènement (si le compactage est effectué avant le soutènement).
- Atténuation des risques de liquéfaction des sols pulvérulents sous le niveau de la nappe, pouvant résulter d'un chargement dynamique ou cyclique (séismes).
- Diminution de la perméabilité du sol dans ou à proximité des barrages ou des digues.
- Amélioration globale des caractéristiques géotechniques dans les sédiments hétérogènes.

Les applications les plus courantes du compactage en profondeur sont l'amélioration des caractéristiques mécaniques du sol pour des projets d'infrastructure (ports, aéroports), et l'atténuation des risques de liquéfaction dans les zones à activité sismique. Le compactage en profondeur s'exécute selon deux familles de méthodes, selon que l'énergie est transmise au sol depuis la surface, ou sous la surface.

3.2.2.1. Compactage depuis la surface

Dans ce genre de compactage on trouve :

- Compactage dynamique : Le sol est compacté par la chute répétée d'un poids important (15 à 25 tonnes, voire plus) tombant d'une grande hauteur (25 m, voire plus). Une masse de 15 t tombant d'une hauteur de 15 m compacte en général le sol sur une épaisseur de 7 à 8 m.

- Rouleau à impact (modèle lourd) : L'impact généré par la rotation d'une masse prismatique (jusque 50 t) compacte plusieurs mètres de sols grenus grossiers, graviers, etc.
- Plaque vibrante lourde (400 t) : À vibreur hydraulique permettant de faire varier la fréquence et l'amplitude (pouvant dépasser 30 cm).

3.2.2.2. Compactage sous la surface

Ce type de compactage comporte :

- Le système MRC : utilise l'effet de résonance dans les couches de sol pour augmenter l'effet de la compaction par vibration. Une sonde vibrante à fréquence variable est foncée à haute fréquence jusqu'à la profondeur voulue, puis réglée sur la fréquence de résonance du sol ;
- La colonne franki : L'énergie de compactage est transmise à l'extrémité d'un tube foncé dans le sol par l'action d'un marteau d'une masse de 10 t qui bat un bouchon de sol compacté se trouvant en bout de tube. Le tube est progressivement foncé dans le sol et les terres entourant l'extrémité de ce tube sont compactées. Une fois la profondeur voulue atteinte, le bouchon est expulsé et le tube est extrait. Un compactage très intense peut être obtenu jusqu'à des profondeurs de plus de 20 m ;
- La vibro-sonde : Permet de compacter 10 à 15 m de sol.

4. Essai permettant de déterminer les paramètres de nature des sols

4.1. Analyse granulométrique par tamisage :

On appelle granulats un ensemble de grains minéraux de dimensions comprises entre 0 et 125 mm, de provenance naturelle ou artificielle, destinés à la confection :

- Des mortiers, des bétons,
- Des couches de fondation, des couches de base et de roulement des chaussées,
- Des assises et des ballasts de voies ferrées.

Les granulats sont appelés fillers, sablons, sables, gravillons, graves ou ballast suivant leurs dimensions.

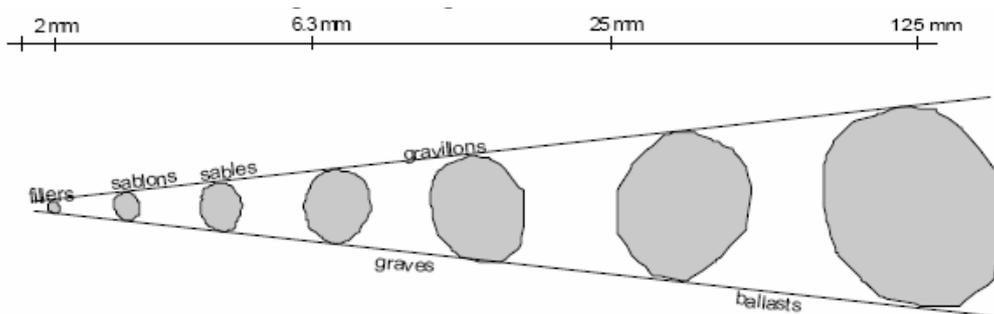


Figure IV 3. Dimensions des granulats

Un granulat est caractérisé du point de vue granulaire par sa classe d/D (le premier désigne le diamètre minimum des grains d et le deuxième le diamètre maximum D). Lorsque d est inférieur à 0.5 mm, le granulat est désigné 0/D. Si un seul chiffre est donné, c'est celui du diamètre maximum D exprimé en mm.

Il existe cinq classes granulaires principales caractérisées par les dimensions extrêmes d et D des granulats rencontrées (Norme NFP18-101) :

- Les fines 0/D avec $D \leq 0,08$ mm ;
- Les sables 0/D avec $D \leq 6,3$ mm ;
- Les gravillons d/D avec $d \geq 2$ mm et $D \leq 31,5$ mm ;
- Les cailloux d/D avec $d \geq 20$ mm et $D \leq 80$ mm ;
- Les graves d/D avec $d \geq 6,3$ mm et $D \leq 80$ mm.

Le granulat est dit de classe d/D lorsqu'il satisfait aux conditions suivantes :

Le refus sur le tamis D est compris entre :

- 1 et 15% si $D > 1.56 d$;
- 1 et 20% si $D \leq 1.56 d$.

Le tamisat (passant) au tamis d est compris entre :

- 1 et 15% si $D > 1.56 d$;
- 1 et 20% si $D \leq 1.56 d$.

Le refus sur le tamis 1.56 D est nul. Le tamisat au tamis 0.63 d $< 3\%$; toutefois pour $D \leq 5$ mm, cette limite est portée à 5%.

4.1.1. But de l'essai :

Déterminer la répartition des grains de sol suivant leur dimension dans un échantillon. Représentation de la répartition de la masse des particules à l'état sec en fonction de leur dimension.

Cette opération permet de déterminer le pourcentage d'éléments fins (passant à $80\mu\text{m}$) qui caractérise la sensibilité à l'eau du matériau d'une part et d'examiner, d'autre part, la forme de la courbe granulométrique.

4.1.2. Principe de l'essai :

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes (Fig. IV 4). Les masses des différents refus et tamisats sont rapportées à la masse initiale du matériau. Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités sous forme graphique.



Figure IV 4. Analyse granulométrique par tamisage

4.1.3. Résultats et interprétations :

Tracé de la courbe granulométrique : Il suffit de porter les divers pourcentages des tamisats cumulés sur une feuille semi-logarithmique (Fig. IV 5) :

- En abscisse : les dimensions des mailles, échelle logarithmique
- En ordonnée : les pourcentages sur une échelle arithmétique.
- La courbe doit être tracée de manière continue.

La forme de la courbe granulométrique obtenue apporte les renseignements suivants : Les dimensions d et D du granulat, la plus ou moins grande proportion d'éléments fins, et la continuité ou la discontinuité de la granularité.

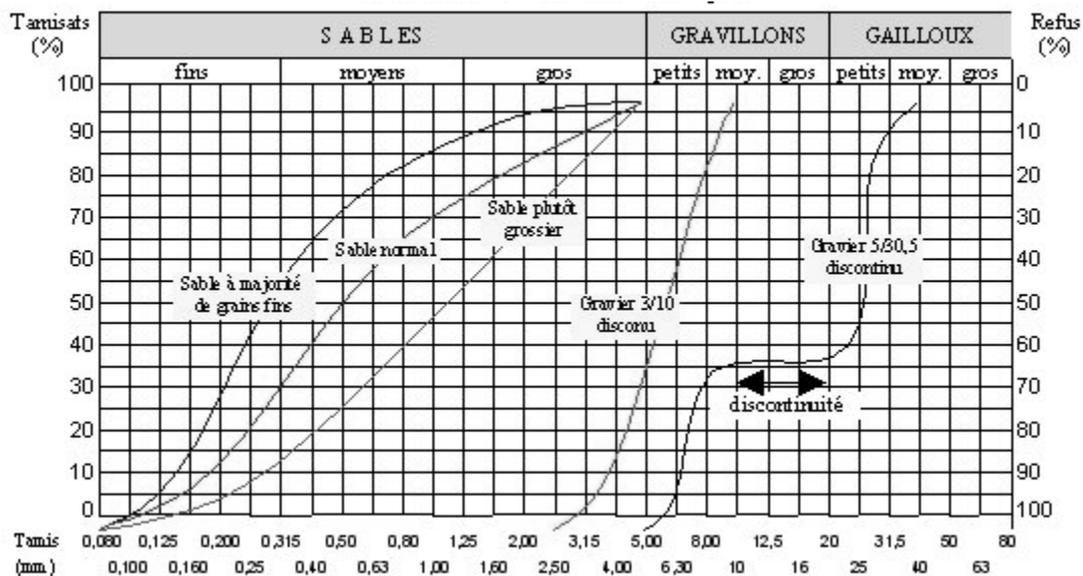


Figure IV 5. Analyse granulométrique

5. L'essai de détermination des paramètres de compactage

5.1. L'essai Proctor

Nous pouvons illustrer ce phénomène avec une situation que nous connaissons tous lorsque nous allons à la plage. Loin de l'eau, le sable est totalement sec, sa teneur en eau est nulle, il ne se tient pas et il est difficile de marcher dessus. Dans l'eau, le sable est détrempe, sa teneur en eau est maximale, et il est tout aussi difficile d'y marcher. Mais entre les deux, là où la mer se retire, la teneur en eau du sable est proche de l'optimum Proctor, le sable est lisse, dur, compacté, et il est facile d'y marcher (Fig. IV 6).

Tous les sols se comportent comme le sable, et on cherchera sur les chantiers à approcher l'optimum Proctor pour avoir la portance maximale du sol



Figure IV 6. Teneur en eau du sable est proche de l'optimum Proctor

5.2. L'objectif de l'essai Proctor

L'essai Proctor a pour but de déterminer, pour un compactage d'intensité donnée, la teneur en eau à laquelle doit être compacté un matériau pour obtenir la masse volumique sèche maximum. La teneur en eau ainsi déterminée est appelée « teneur en eau optimum Proctor ».

5.3. Principe de l'essai :

L'essai Proctor, complètement normalisé, consiste à placer dans un moule de dimensions déterminées, un échantillon humidifié de manière homogène à une teneur en eau donnée, peu élevée au début, et à compacter cet échantillon par couches au moyen d'une dame de poids standardisé tombant d'une hauteur standardisée.

Pour chacune des teneurs en eau considérée, on détermine le poids volumique sec du sol et on établit la courbe des variations de ce poids volumique en fonction de la teneur en eau.

L'essai Proctor est répété plusieurs fois de suite sur des échantillons portés à des teneurs en eau croissantes. On détermine ainsi plusieurs points de la courbe représentative des masses

volumiques sèches en fonction des teneurs en eau. On trace alors la courbe en interpolant entre les points expérimentaux. Elle représente un maximum dont l'abscisse est « la teneur en eau optimum Proctor », et l'ordonnée « la masse volumique sèche maximum Proctor » (Fig. IV 7).

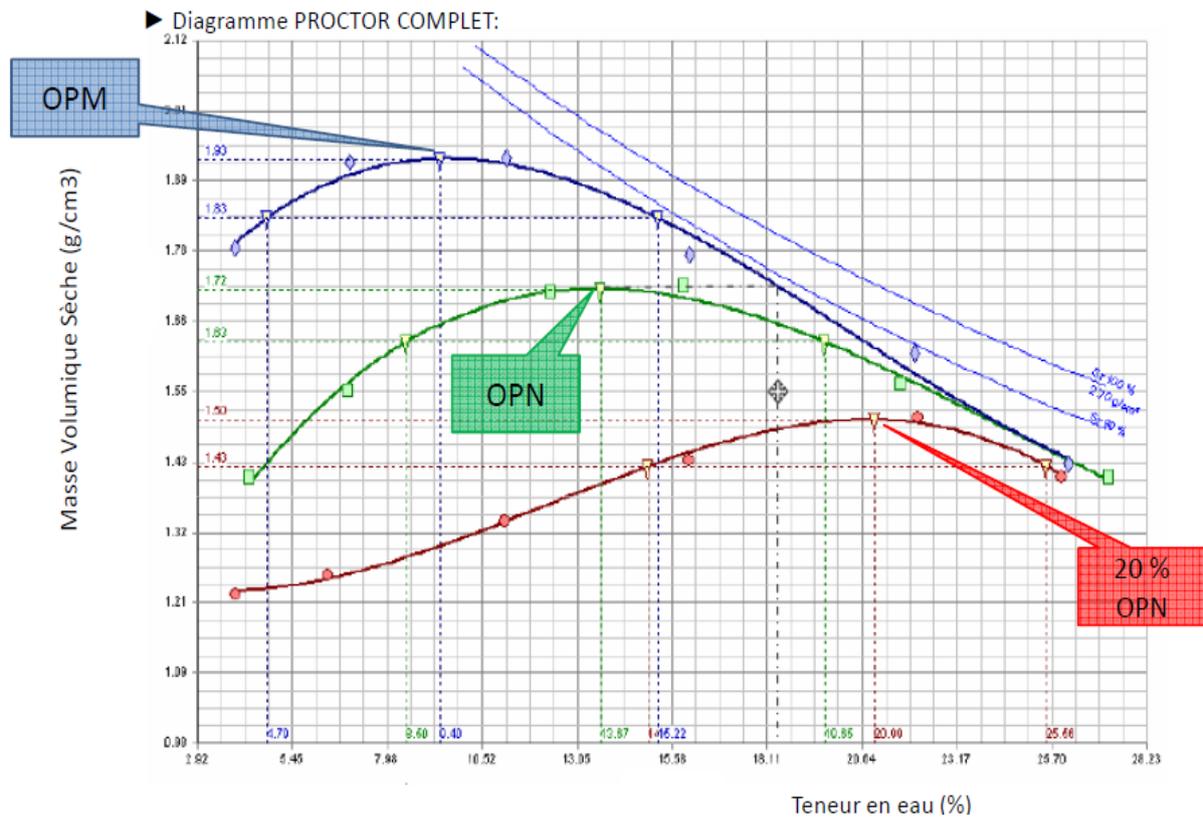


Figure IV 7. L'essai Proctor

Le choix de l'intensité de compactage est fait en fonction de la surcharge que va subir l'ouvrage au cours de sa durée de vie :

- Essai Proctor normal : Résistance souhaitée relativement faible, du type chaussé peu chargé,
- Essai Proctor modifié : Forte résistance souhaitée, du type chaussé autoroutière.



Figure IV 8. Equipement essai Proctor

6. Les essais de détermination des paramètres de comportement mécanique

6.1. Essai Los Angeles (Résistance à la fragmentation des gravillons)

L'objet de cet essai est de déterminer la résistance aux chocs. Il consiste à mesurer la quantité des éléments fins produits en soumettant le granulat aux chocs de boules normalisés dans une machine dite « Los Angeles » qui est un broyeur de laboratoire (Fig. IV 9).

Tamisée sur chacun des tamis de la classe granulaire choisie, lavée, séchée et pesée (à 1 g près), la prise d'essai (5000 +/- 5 g) est placée dans un tambour avec une charge de boulets appropriée. Entraînés durant 500 tours par tablette en acier, ces boulets retombent avec les matériaux qu'ils fragmentent. Ce dernier est ensuite lavé sur un tamis de 1.6 mm, séché et le passant est pesé (masse m).

Les seuils retenus diffèrent selon les utilisations des sols. Au-delà de 45, le sol ne peut pas être utilisé en couche de forme.



Figure IV 9. La machine Los Angeles

6.2. Essai Micro-Deval (Résistance à l'usure des gravillons)

L'objectif de cet essai est d'apprécier la résistance à l'usure des granulats ; l'essai est réalisé en présence d'eau pour se rapprocher des conditions réelles de séjour des granulats dans les chaussées.

Il consiste à mesurer dans des conditions bien définies l'usure des granulats par frottements réciproques dans un cylindre en rotation. L'usure est mesurée par la quantité de fines produites. Cas d'un gravillon compris entre 4 et 14 mm : Lavée, séchée et pesée (à 1 g près), la prise d'essai (500 +/- 2 g) est introduite dans un cylindre normalisé avec une charge de billes d'acier (2000, 4000 ou 5000 g selon la granularité), et 2.5 litres d'eau. Après 12000 rotations (2 heures), le matériau est lavé sur un tamis de 1.6 mm, séché et le refus est pesé (masse m').

Le seuil est également différent selon l'utilisation voulue du matériau (Fig. IV 10).



Figure IV 10. Essai Micro Deval

TD-4

Géotechnique (Analyse granulométrique)**1. Objectifs de TP :**

L'analyse granulométrique a trois buts

- Déterminer les dimensions des grains
- Déterminer les proportions de grains de même dimension (% pondéral)
- En déduire le module de finesse (Mf).

2. Avant-propos :

L'analyse granulométrique consiste à déterminer la distribution dimensionnelle des grains constituant un granulat dont les dimensions sont comprises entre 0,063 et 125mm. On appelle :

- **Refus sur un tamis** : la quantité de matériau qui est retenue sur le tamis.
- **Tamisat (ou passant)** : la quantité de matériau qui passe à travers le tamis.

On appelle granulat un ensemble de grains minéraux, de dimensions comprises entre 0 et 125mm, de provenance naturelle ou artificielle, destinés à la confection :

- Des mortiers, des bétons,
- Des couches de fondation, des couches de base et de roulement des chaussées,
- Et des assises et des ballasts de voies ferrées.

3. Classes granulaires :

- Un granulat est caractérisé du point de vue granulaire par sa classe **d/D**.
- Le premier désigne le diamètre minimum des grains **d** et le deuxième le diamètre maximum **D**.
- Lorsque **d** est inférieur à 0,5mm, le granulat est désigné **0/D**.
- Si un seul chiffre est donné, c'est celui du diamètre maximum **D** exprimé en mm

Il existe cinq classes granulaires principales caractérisées par les dimensions extrêmes d et D des granulats rencontrées (Norme NFP18-101) :

- **Les fines** 0/D avec **$D \leq 0,08 \text{ mm}$** ,
- **Les sables** 0/D avec **$D \leq 6,3 \text{ mm}$** ,
- **Les gravillons** d/D avec **$d \geq 2 \text{ mm}$ et $D \leq 31,5 \text{ mm}$** ,
- **Les cailloux** d/D avec **$d \geq 20 \text{ mm}$ et $D \leq 80 \text{ mm}$** ,
- **Les graves** d/D avec **$d \geq 6,3 \text{ mm}$ et $D \leq 80 \text{ mm}$** ,

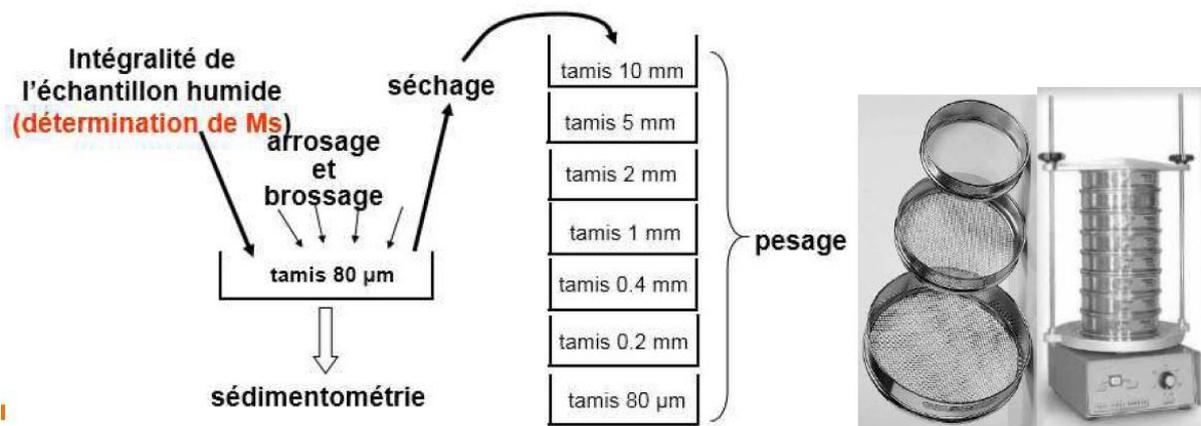
Le granulat est dit de classe d/D lorsqu'il satisfait aux conditions suivantes :

- Le refus sur le tamis D est compris entre :
 - o 1 et 15% si $D > 1.56 d$,
 - o 1 et 20% si $D \leq 1.56 d$

- Le tamisat au tamis d est compris entre :
 - o 1 et 15% si $D > 1.56 d$,
 - o 1 et 20% si $D \leq 1.56 d$
- Le refus sur le tamis 1.56 D est nul,
- Le tamisat au tamis 0.63 d $< 3\%$; toutefois pour $D \leq 5\text{mm}$, cette limite est portée à 5%.

4. Principe de l'essai :

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes.



Les masses des différents refus et tamisats sont rapportées à la masse initiale du matériau. Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités sous forme graphique.

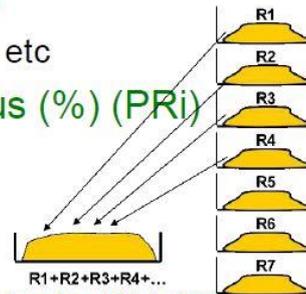
4.1. Matériel utilisé :

- Les dimensions de mailles et le nombre de tamis sont choisis en fonction de la nature de l'échantillon et de la précision attendue.
- La norme actuelle (EN 933-2) préconise, pour l'analyse granulométrique, la série de tamis suivante en (mm) : **0.063, 0.125, 0.25, 0.50, 1, 2, 4, 8, 16, 31.5, 63, 125**.

5. Démarches à suivre :

- Peser le refus du tamis ayant la plus grande maille : soit R1 la masse de ce refus.
- Poursuivre la même opération avec tous les tamis de la colonne pour obtenir les masses des différents refus cumulés ...
- Les masses des différents refus cumulés R_i sont rapportées à la masse totale de l'échantillon m_1 .
- Les pourcentages de refus cumulés ainsi obtenus, sont inscrits sur la feuille d'essai. Le pourcentage des tamisats cumulés sera déduit.

- 1- Pesage des refus cumulés (R_i)
 - $R_1, (R_1 + R_2), R_1 + R_2 + R_3, \dots$ etc
- 2- Calcul du pourcentage des refus (%) (PR_i)
 - $R_1 / M_s = PR_1$
 - $(R_1 + R_2) / M_s = PR_2$
 - $(R_1 + R_2 + R_3) / M_s = PR_3 \dots$ etc
- 3- Calcul du pourcentage des tamisats (%) (T_i)
 - $T_1 = 1 - PR_1$
 - $T_2 = 1 - PR_2$
 - $T_3 = 1 - PR_3$



6. Tracé de la courbe granulométrique

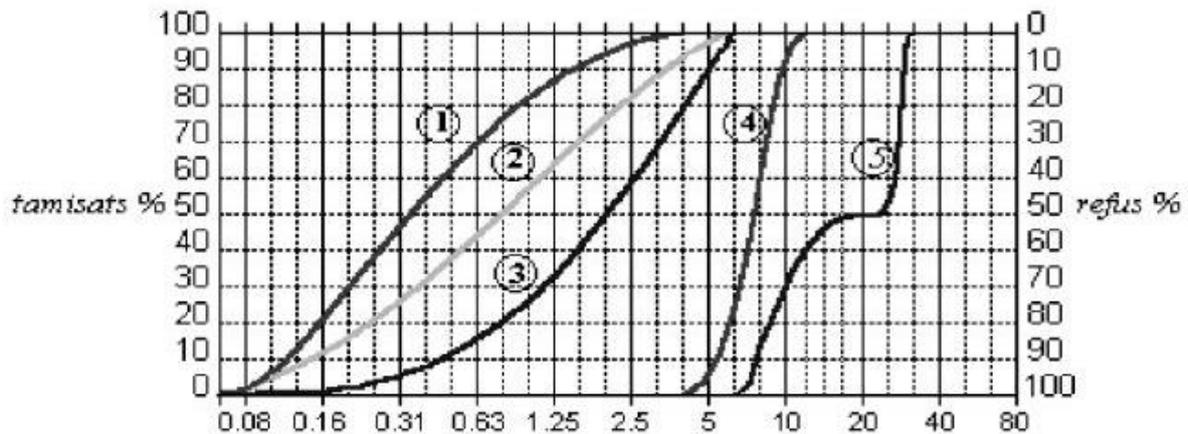
Il suffit de porter les divers pourcentages des tamisats cumulés sur une feuille semi-logarithmique :

- En abscisse : les dimensions des mailles, échelle logarithmique
- En ordonnée : les pourcentages sur une échelle arithmétique.
- La courbe doit être tracée de manière continue

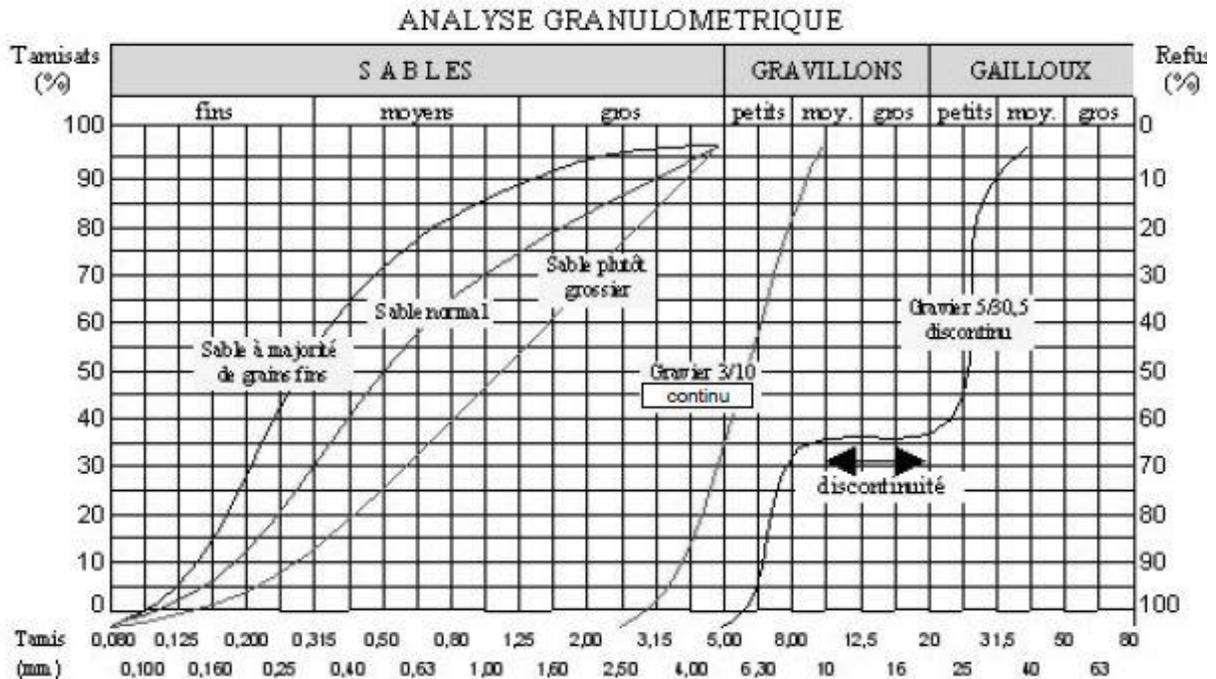
6.1. Interprétation des courbes

La forme de la courbe granulométrique obtenue apporte les renseignements suivants :

- Les dimensions d et D du granulat,
- La plus ou moins grande proportion d'éléments fins,
- La continuité ou la discontinuité de la granularité.



- | | |
|-------------------------------------|---|
| 1. Sable à majorité de grains fins, | 4. gravillon 5/10 à granulométrie continue |
| 2. Sable normal, | 5. gravillon 5/25 à granulométrie discontinue |
| 3. Sable plutôt grossier | |



7. Module de finesse

- Les sables doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion.
- Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse (MF).
- Le module de finesse est d'autant plus petit que le granulat est riche en éléments fins.

Le module de finesse est égal au 1/100^e de la somme des refus cumulés exprimée en pourcentages sur les tamis de la série suivante : 0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5mm.

$$MF = \frac{1}{100} \sum \text{Refus cumulés en \% des tamis } \{ 0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,50 - 5 \}$$

Lorsque MF est compris entre :

- 1.8 et 2.2 : le sable est à majorité de grains fins,
- 2.2 et 2.8 : on est en présence d'un sable préférentiel,

2.8 et 3.3 : le sable est un peu grossier. Il donnera des bétons résistants mais moins maniables

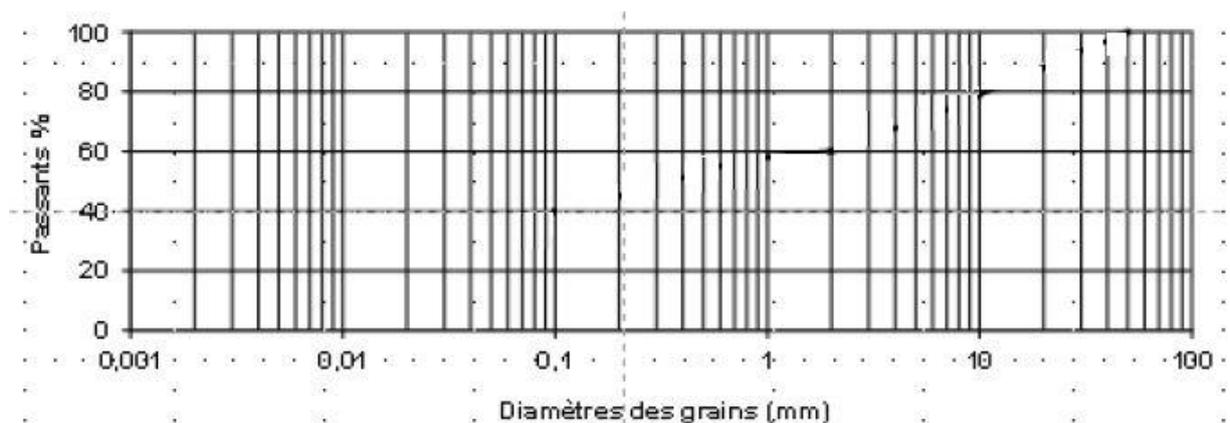
Exercice

Lire attentivement l'énoncé avant de commencer l'exercice ?

Soit un matériau ayant un poids sec initial $M = 3000\text{g}$

Diamètres des tamis (mm)	Refus de chaque tamis (g)	Refus cumulés (g)	(%) des refus cumulés	(%) des passants cumulés
50	0			
20	300			
10	200			
5	250			
2.5	100			
2	140			
1.25	100			
0.63	120			
0.315	200			
0.16	150			
0.1	500			
0.08	400			

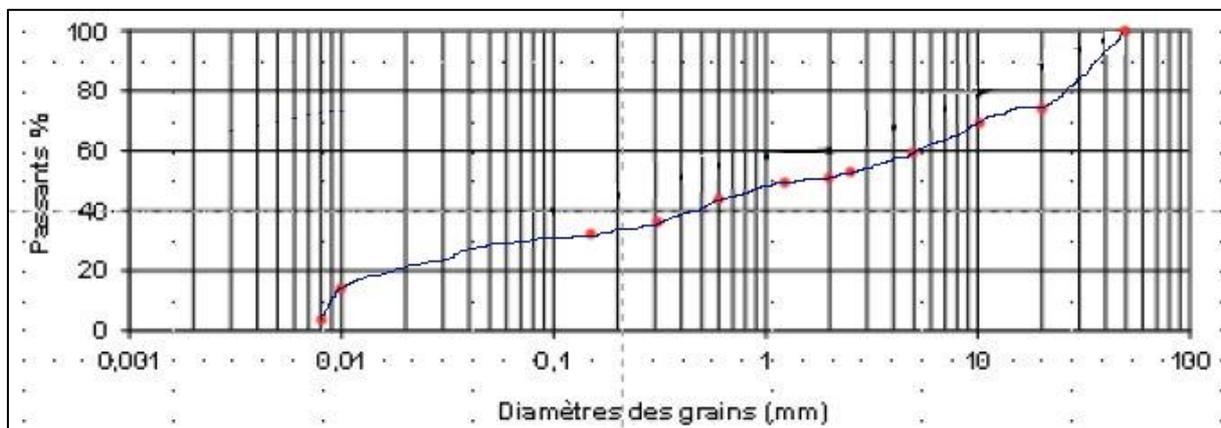
- Compléter le tableau ci-dessus ?
- Tracer la courbe granulométrique en utilisant le graphe en annexe A ?
- Calculer le module de finesse ?
- Que représente ce module pour votre échantillon ?



Correction

Diamètres des tamis (mm)	Refus de chaque tamis (g)	Refus cumulés (g)	(%) des refus cumulés	(%) des passants cumulés
50	0	0	0.0	100.0
20	300	750	25.0	75.0
10	200	950	31.7	68.3
5	250	1200	40.0	60.0
2.5	100	1300	43.3	56.7
2	140	1440	48.0	52.0
1.25	100	1540	51.3	48.7
0.63	120	1660	55.3	44.7
0.315	200	1860	62.0	38.0
0.16	150	2010	67.0	33.0
0.1	500	2510	83.7	16.3
0.08	400	2910	97.0	3.0

- La courbe granulométrique en utilisant le graphe en annexe A



- Le module de finesse

$$MF = \frac{1}{100} \sum \text{Refus cumulés en \% des tamis } \{ 0.16 - 0.315 - 0.63 - 1.25 - 2.50 - 5 \}$$

$$MF = 3.18$$

- Que représente ce module pour votre échantillon ?

MF est compris entre 2.8 et 3.3. Alors, ce module représente un sable un peu grossier. Il donnera des bétons résistants mais moins maniables.

Environnement



A l'issu de ce chapitre l'apprenant sera capable à comprendre :

- *L'effet de serre ;*
- *L'origine des gazes à effet de serre ;*
- *Les principaux gaz à effet de serre produits par l'activité humaines ;*
- *Les conséquences probables du réchauffement climatique ;*
- *Comment réduire les émissions de gaz à effet de serre ?*

1. Définition

Selon la norme ISO 14001 :1996, l'environnement est « le milieu dans lequel un organisme fonctionne, incluant l'air, l'eau, la terre, les ressources naturelles, la flore, la faune, les êtres humains et leurs interrelations »,

Le terme environnement ne doit pas être confondu avec le terme écologie, qui fait référence à la science des processus et cycles de vie dans le monde naturel, sans se limiter à l'humanité.

Parmi les parties de l'environnement et les éléments qui le composent : L'atmosphère, l'eau, la terre (sol et sous-sol), la flore, la faune, le climat et tous les écosystèmes de la planète....

Cependant, nous pouvons distinguer deux types d'environnement : l'environnement naturel et l'environnement construit. La différence est que le premier se produit naturellement, tandis que le second est l'environnement que l'homme a modifié. Dans ce sens, on peut parler de paysages naturels et de paysages culturels.

2. Pollution de l'environnement

La pollution environnementale est tout ce qui porte atteinte à l'air, au sol, à l'eau, à la flore et à la faune. Une partie de cette pollution est naturelle, par exemple, lorsqu'un volcan entre en éruption, il libère une grande quantité de gaz et de produits qui peuvent endommager l'écosystème. Cependant, la majeure partie de la pollution environnementale est produite par les activités humaines, que ce soit à travers les plastiques dans la mer, les déchets dans les montagnes ou l'émission des gazes à effet de serre dans l'atmosphère (Fig. V 1). Parmi les conséquences de la pollution environnementale nous avons le réchauffement climatique Pour en savoir plus sur ce sujet, il est très important de consulter les travaux de Dr. ROBERT Kandel, Directeur de Recherche au CNRS (*Duchemin, 2002*).



Figure V 1. Pollution environnementale

3. Le réchauffement climatique

Appelé également réchauffement planétaire ou réchauffement global, est un phénomène d'augmentation de la température moyenne des océans et de l'atmosphère, mesuré à l'échelle mondiale et sur plusieurs années.

Certaines de ces causes sont d'origines humaine, comme la déforestation et la production de dioxyde de carbone par combustion de matière fossile (Fig. V 2). D'autres sont naturelles, comme l'activité solaire ou les émissions volcaniques.

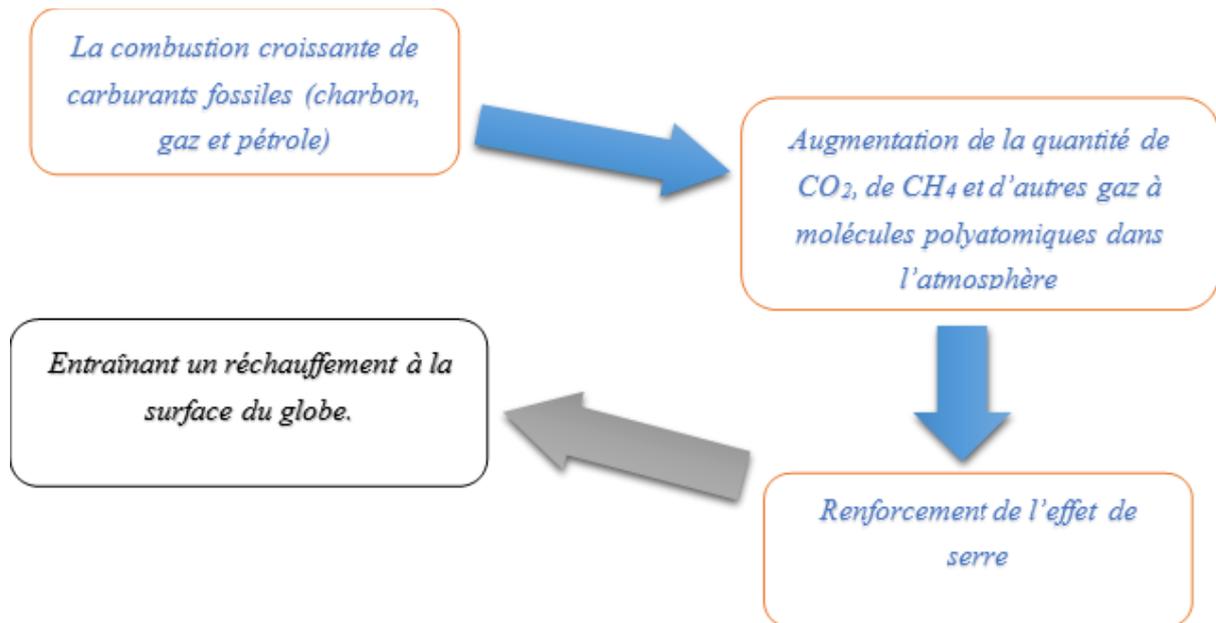


Figure V 2. La combustion de carburants fossiles entraîne un renforcement de l'effet de serre. Le rayonnement infrarouge terrestre n'est pas entièrement rediffusé vers l'espace. Une grande partie est interceptée par certains gaz de l'atmosphère : les gaz dits à effet de serre (Fig. V 3).

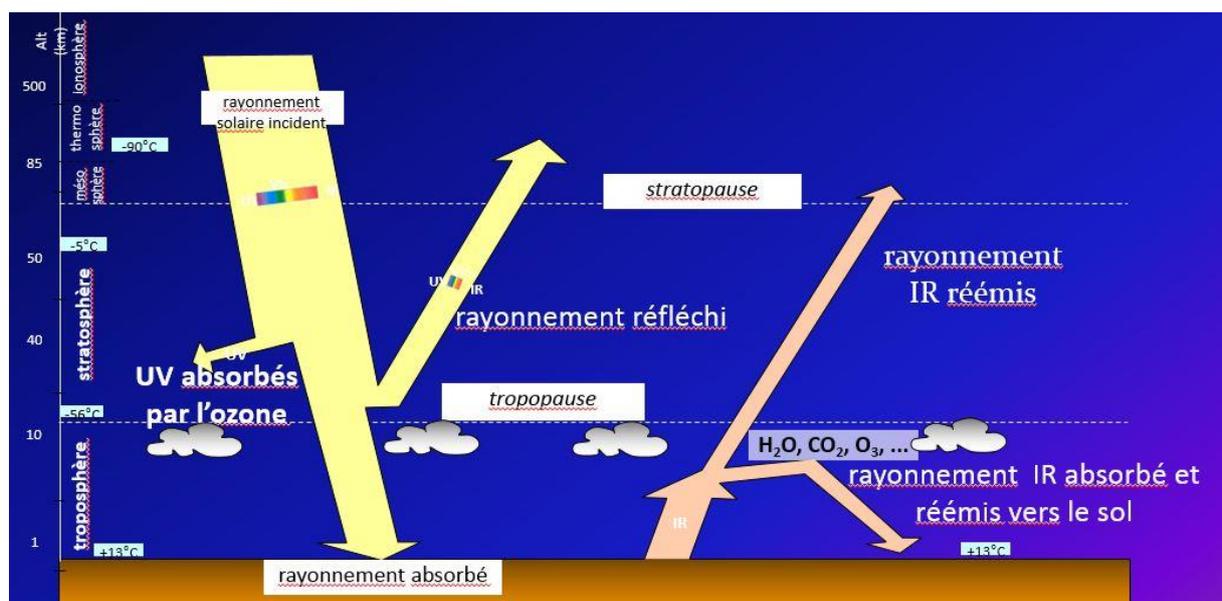


Figure V 3. Rayonnement infrarouge terrestre intercepté par les gaz à effet de serre

3.1. Qu'est-ce qu'un gaz à effet de serre ?

C'est un gaz dont les molécules sont susceptibles d'absorber une partie du rayonnement infrarouge qu'il reçoit de la Terre. Les principaux gaz à effet de serre sont la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone, le méthane, les oxydes nitreux et l'ozone, etc.

Les gaz à effet de serre forment une couverture autour de la Terre. Cette couverture permet de garder la chaleur dans l'atmosphère et d'avoir une température vivable sur Terre.

L'effet de serre est un phénomène naturel lié à la présence de gaz à effet de serre qui piègent le rayonnement infrarouge émis par la Terre vers l'atmosphère. Cet effet de serre permet à l'atmosphère (troposphère) de se maintenir à une température moyenne de $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, et sans lui, la température moyenne serait de l'ordre de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$. Mais les activités humaines rejettent trop de gaz à effet de serre comme du dioxyde de carbone, du méthane, de l'oxyde nitreux, des CFC. Cela conduit à une augmentation de l'effet de serre. La température augmente alors : c'est le réchauffement planétaire (Fig. V 4).



Figure V4. La température et l'effet de serre

3.2. Evolution de la concentration des gaz à effet de serre

L'analyse de données de la concentration des gaz à effet de serre (CO_2 , CH_4 , N_2O et CFC) depuis 1850 (Fig. V 5), nous montre une croissance flagrante à savoir :

- La croissance du dioxyde de carbone (CO_2), particulièrement depuis 1957 ;
- L'augmentation de la concentration du méthane, qui a plus que doublé, passant de 800ppb en 1850 à plus que 1700ppb aujourd'hui ;
- Le protoxyde d'azote (N_2O) : Ces émissions proviennent des sols agricoles (l'utilisation massive d'engrais chimiques), de l'alimentation de bétail et de l'industrie chimique ;
- Les chlorofluorocarbures CFC : Sont des composés gazeux qui contiennent des molécules avec des atomes de carbone liés avec du fluor et du chlore. Les CFC sont utilisés, par exemple, en tant que réfrigérant. Ces composés ont une très longue durée

de vie. L'implication des CFC dans la destruction de l'ozone (O_3) a conduit à l'adoption en 1987 du protocole de Montréal, mettant fin à leur production.

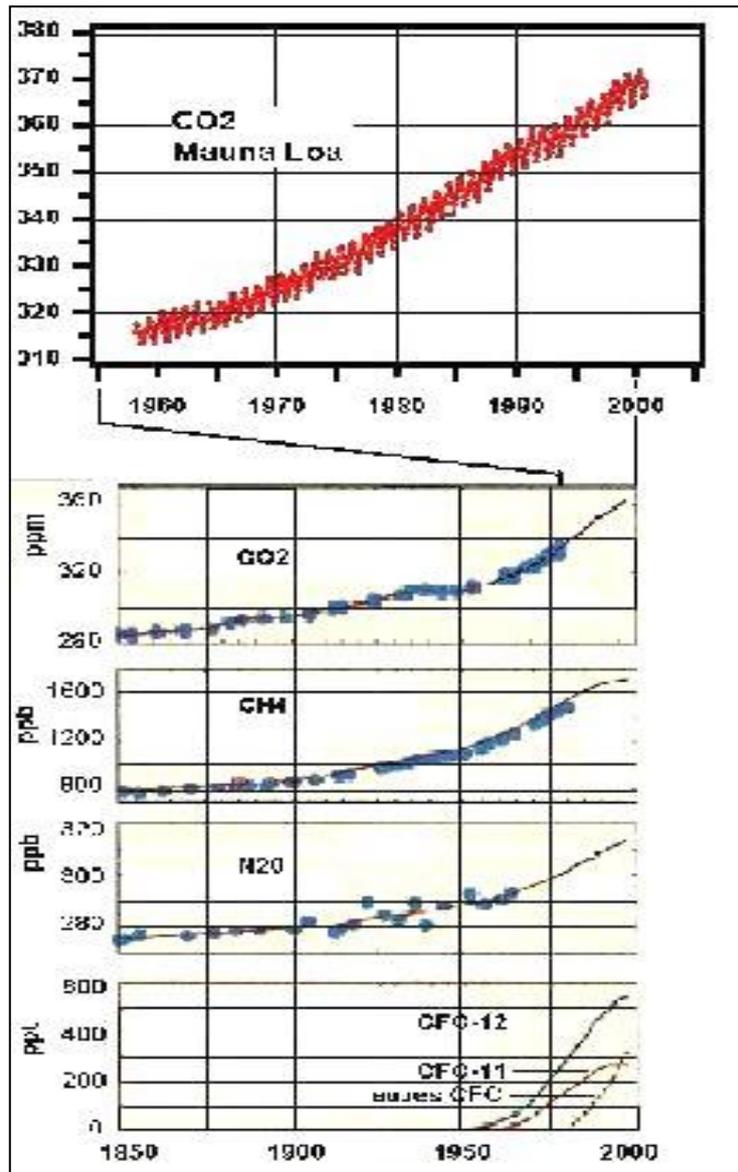


Figure V.5. Evolution depuis 1850 des teneurs atmosphériques de plusieurs gaz à effet de serre (CO_2 , CH_4 , N_2O et CFC)

3.2.1. La fumée noire

Résulte des feux de forêt, cheminées d'habitations ou d'usines (la mise à feu par les Irakiens des puits de pétrole du Koweït en 1991, affectent des régions étendues pendant des périodes limitées). L'atmosphère est lourdement chargée d'aérosols carbonés.

Ces particules ne restent pas longtemps dans l'air, étant lessivées par les précipitations.

3.2.2. Les aérosols

Sont des particules en suspension solides et liquides. Certains sont d'origine naturelle : poussières désertiques emportées par le vent, cristaux de sel des embruns, aérosols formés à partir du SO_2 volcanique Mais d'autres aérosols résultent d'activités humaines : aérosols de sulfates formés à partir du SO_2 anthropique ainsi que les suies.

3.2.3. Le dioxyde de soufre SO_2

Les émissions de ce gaz dépendent à la fois de processus naturels (éruptions volcaniques) et de la combustion de charbon ou de pétrole contenant des impuretés de soufre. Dans l'atmosphère, le SO_2 se transforme en particules acides, notamment en gouttelettes d'acide sulfurique, particules rapidement lessivées par les précipitations (la cause principale de l'augmentation des pluies acides).

Les activités humaines altèrent l'atmosphère avec la pollution par le dioxyde de soufre (SO_2), qui tend à renforcer l'effet parasol sur certaines régions du globe. En effet, les émissions anthropiques de SO_2 augmentent fortement en Asie depuis 1980, elles diminuent en Europe et en Amérique du Nord (Fig. V 6).

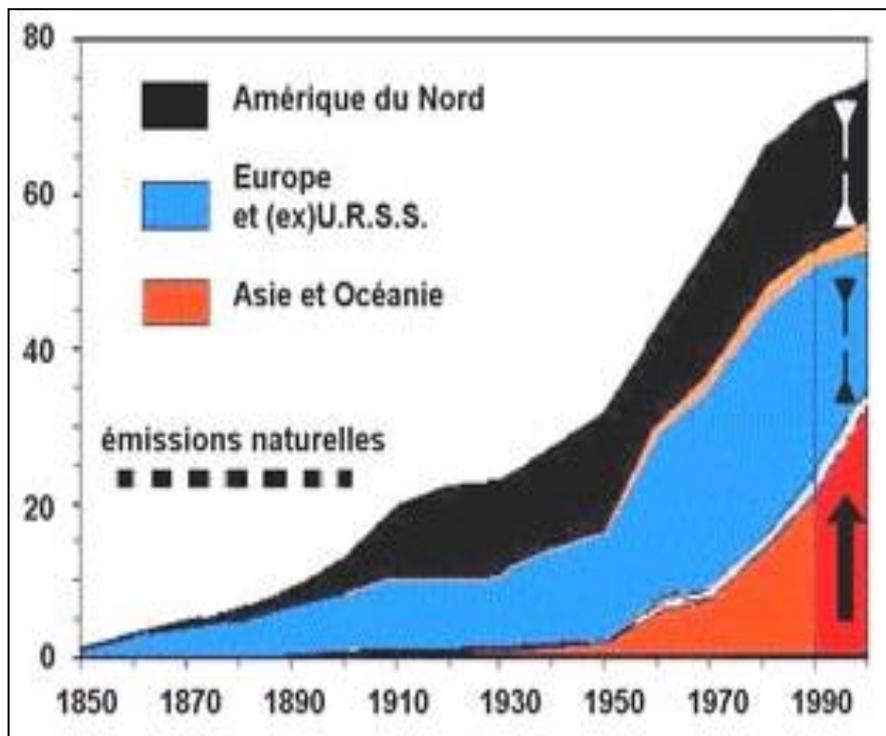


Figure V 6. Les émissions anthropiques de SO_2 (en millions de tonnes de soufre par an)

3.3. Qu'est-ce que l'effet parasol ?

L'effet parasol se résume comme un effet qui refroidit l'atmosphère en rejetant les rayons lumineux chauffant du soleil. En étant refroidisseur de l'atmosphère, le phénomène se place donc à l'opposé de celui plus connu d'effet de serre.

Environ un tiers de rayonnement solaire est renvoyé vers l'espace, soit par réflexion, soit par diffusion par les nuages et les particules en suspension dans l'atmosphère : c'est l'effet parasol (Fig. V 7).

L'énergie restante est absorbée, soit par l'atmosphère, soit par la surface de la Terre et transformée en chaleur. La surface terrestre, ainsi chauffée par le Soleil, renvoie un rayonnement infrarouge vers l'atmosphère. Mais dans le même temps la quantité de particules dans l'atmosphère augmente également, d'où un accroissement de l'effet parasol qui va dans le sens du refroidissement.

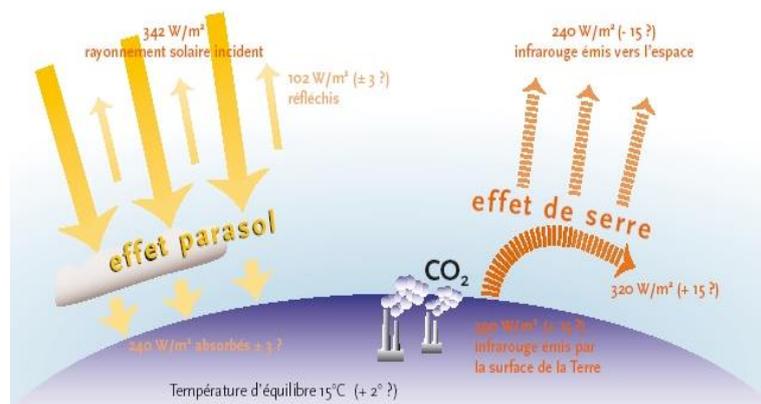


Figure V 7. Le bilan radiatif et sa perturbation anthropique (Impact estimé de l'effet de serre et de l'effet parasol sur le bilan énergétique de la terre)

3.4. Variations du climat et de la composition de l'air en fonction du temps

Les analyses faites au Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement (Grenoble), de la composition de bulles d'air piégées dans les glaces de Vostok (Antarctique) montrent que le CO_2 et le CH_4 ont varié en même temps que le climat. Les variations de la température et les alternances glaciaires-interglaciaires dans le volume des glaces sont déterminées à partir des rapports des isotopes d'hydrogène et d'oxygène.

La figure ci-dessous montre la relation proportionnelle entre l'évolution temporelle de CO_2 , CH_4 et climat, observés depuis 400 milliers d'années, et ceux attendus au 21^{ème} siècle (Fig. V 8).

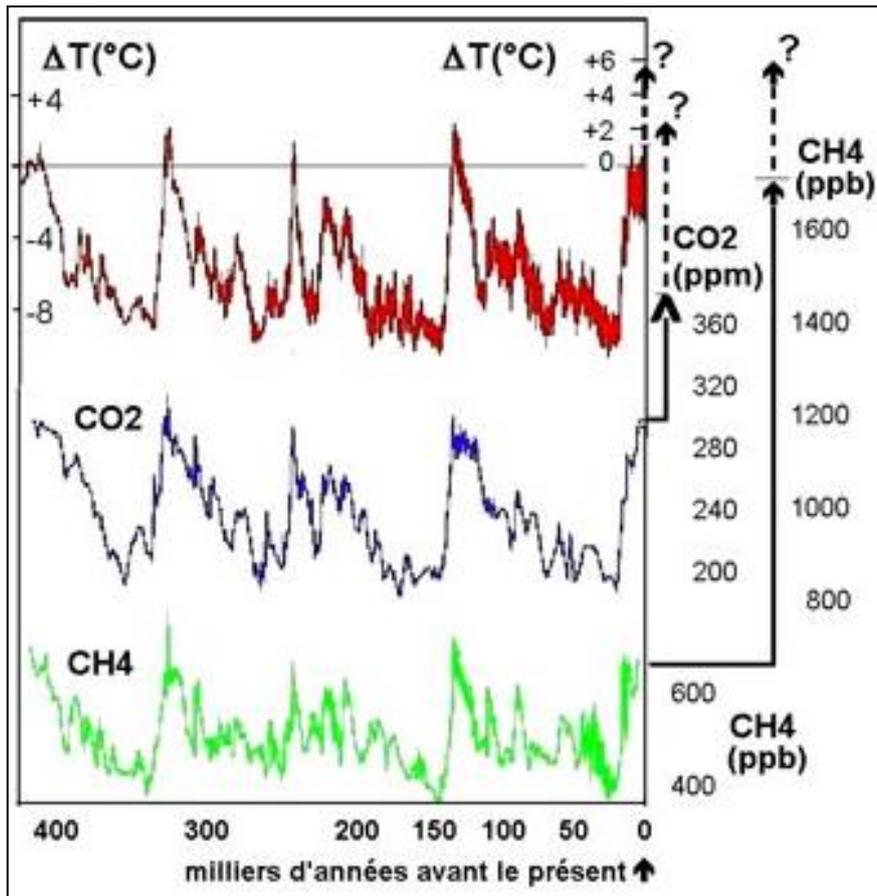


Figure V 8. Variation temporelle de CH₄, CO₂ et climat depuis des milliers d'années

Selon les prévisions actuelles des modèles climatiques, la hausse des températures devrait se poursuivre au cours du 21^{ème} siècle à cause des gaz à effet de serre. On prévoit que : Plus on émettra de gaz à effet de serre, plus la planète se réchauffera. Plus le réchauffement sera important et rapide, plus les conséquences seront néfastes.

3.5. Quelles sont les conséquences probables du réchauffement climatique ?

Un réchauffement global fort implique une modification du cycle de l'eau. Cette modification comporte une augmentation de la quantité de vapeur d'eau atmosphérique et donc un renforcement de sa contribution à l'effet de serre.

- Retrait des glaciers ;
- Fonte de la banquise ;
- Élévation du niveau moyen des océans, les risques d'inondation des plaines côtières ;
- Les infiltrations d'eaux salées dans des nappes phréatiques côtières vont augmenter, ce qui compliquera encore plus le problème d'approvisionnement en eau potable dans maintes régions très peuplées ;
- Sécheresses, etc.



Figure V9. Conséquences de réchauffement climatique

TD-5

EnvironnementExercice 1

Texte lacunaire : Qu'est-ce que l'effet de serre naturel ?

L'effet de serre est un mécanismequi se produit en plusieurs étapes. Le soleil envoie de..... sous forme de..... à la terre. Une fois réchauffée, la Terre rejette la chaleur vers..... La chaleur est retenue par des gaz présents dans l'atmosphère, les.....On les appelle ainsi, car comme dans une serre de jardin, ils.....l'énergie et la renvoient vers la Terre. Sans cela, la température sur Terre serait de.....au lieu de.....

Mots à replacer dans le texte :

-18°C / gaz à effet de serre / l'espace / rayonnements / naturel / 15°C / emprisonnent / l'énergie

Exercice 2 :

Répondre par vrai ou faux (V pour VRAI et F pour FAUX) :

- Il y a toujours eu des changements climatiques dans l'histoire du climat. V / F
- La fonte des icebergs est une des causes principales du changement climatique actuel. V / F
- A chaque fois que l'on change de saison, il y a un changement climatique. V / F
- L'homme est victime du changement climatique actuel. V / F
- L'homme n'est pas responsable du changement climatique actuel. V / F
- Depuis le début de ce siècle la température sur Terre a augmenté de 5,4°C en moyenne. V / F
- L'effet de serre est un mécanisme qui se produit une fois par an. V / F
- Les gaz à effet de serre sont présents naturellement dans l'atmosphère. V / F
- Il existe un lien entre la température moyenne qu'il fait sur Terre et la quantité de gaz à effet de serre présents dans l'atmosphère. V / F
- L'homme produit des gaz à effet de serre qui s'additionnent à la quantité de gaz à effet de serre déjà présents naturellement dans l'atmosphère. V / F

Exercice 3 :

Le climat est en train de se réchauffer. Ce réchauffement a plusieurs effets sur la nature, les animaux, les végétaux et sur l'homme. Tu y as déjà réfléchi ? Le tableau ci-dessous présente plusieurs effets causés par le changement climatique actuel. Parmi ceux-ci, choisis-en 4 et essaie d'imaginer quel(s) impact(s) ces effets auront sur toi et sur le monde qui t'entoure.

Effets du changement climatique actuel	Conséquences sur moi	Conséquences sur le monde qui m'entoure
	Augmentation de la température	
	Hausse du niveau des océans	
	Modification du rythme des espèces	

	Déplacement des espèces		
	Fonte de la banquise		
	Aggravation de la sécheresse		
	Augmentation de la fréquence des catastrophes naturelles		

Correction (exercice 1)**Qu'est-ce que l'effet de serre naturel ?**

L'effet de serre est un mécanisme **naturel** qui se produit en plusieurs étapes. Le soleil envoie de **l'énergie** sous forme de **rayonnements** à la terre. Une fois réchauffée, la Terre rejette la chaleur vers **l'espace**. La chaleur est retenue par des gaz présents dans l'atmosphère, **les gaz à effet de serre**. On les appelle ainsi, car comme dans une serre de jardin, ils **emprisonnent** l'énergie et la renvoient vers la Terre. Sans cela, la température sur Terre serait de **-18°C** au lieu de **15°C**.

Correction (exercice 2)

Répondre par vrai ou faux (V pour VRAI et F pour FAUX) :

- a. Il y a toujours eu des changements climatiques dans l'histoire du climat. **V**
- b. La fonte des icebergs est une des causes principales du changement climatique actuel. **F**
- c. A chaque fois que l'on change de saison, il y a un changement climatique. **F**
- d. L'homme est victime du changement climatique actuel. **V**
- e. L'homme n'est pas responsable du changement climatique actuel. **F**
- f. Depuis le début de ce siècle la température sur Terre a augmenté de 5,4°C en moyenne. **F**
- g. L'effet de serre est un mécanisme qui se produit une fois par an. **F**
- h. Les gaz à effet de serre sont présents naturellement dans l'atmosphère. **V**
- i. Il existe un lien entre la température moyenne qu'il fait sur Terre et la quantité de gaz à effet de serre présents dans l'atmosphère. **V**
- j. L'homme produit des gaz à effet de serre qui s'additionnent à la quantité de gaz à effet de serre déjà présents naturellement dans l'atmosphère. **V**

Correction (exercice 3) :

L'impact de changement climatique

Effets du changement climatique actuel		Conséquences sur moi	Conséquences sur le monde qui m'entoure
	Augmentation de la température	Je ferais plus d'activités à l'extérieur	Cela peut être dangereux pour les personnes plus faibles comme les bébés ou les personnes âgées.
	Hausse du niveau des océans	Risque d'inondation de notre caravane située à Ostende.	Risque d'inondation pour toutes les régions situées près des côtes.
	Modification du rythme des espèces	Je pourrais voir plus tôt dans l'année les fleurs fleurir et les arbres bourgeonner.	Risque de décalage entre le rythme de plusieurs espèces liées les unes aux autres dans la chaîne alimentaire.
	Déplacement des espèces	Je pourrais observer de nouvelles espèces encore jamais rencontrées auparavant.	Disparition des espèces locales qui se déplacent vers le Nord pour retrouver un climat plus froid.

	<p>Fonte de la banquise</p>	<p>Pas de conséquence directe pour moi puisque je ne vis pas dans la région arctique.</p>	<p>Risque de disparition d'espèces dépendant de la banquise pour vivre comme l'ours polaire.</p>
	<p>Aggravation de la sécheresse</p>	<p>Parce que plein de personnes auront encore moins accès à l'eau, nous aussi on devra faire plus attention de ne pas la gaspiller.</p>	<p>Accès de plus en plus difficile à l'eau pour les habitants de certains pays d'Afrique et les pays autour de la méditerranée, par exemple.</p>
	<p>Augmentation de la fréquence des catastrophes naturelles</p>	<p>Pas de conséquence directe pour moi, car j'ai la chance de vivre dans une région peu touchée par les catastrophes naturelles.</p>	<p>Beaucoup de personnes dans le monde sont directement menacées, risquent de voir leurs maisons détruites et d'être obligées de se réfugier dans des zones moins dangereuses.</p>

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Beck, R., 1904. *Traité des gisements métallifères*. Ch. Béranger.
- Bergado, D., Anderson, L., Miura, N., Balasubramaniam, A., 1996. *Soft ground improvement in lowland and other environments*. AsCE.
- Biju-Duval, B., 1999. *Géologie sédimentaire : bassins, environnements de dépôts, formation du pétrole*. Editions Technip.
- Bingtao, L., 1989. *Un bref rapport sur les caractéristiques du gisement de tungstène de type placer dans des argiles résiduelles altérées à Guanshandong*.
- Bouladon, J., 1964. *Les gisements métallifères. Géologie et principes de recherche par P. Routhier, 1963. Bull. Minéralogie 87, 119–120.*
- Castany, G., 1982. *Principes et méthodes de l'hydrogéologie*.
- Cossé, R., 1988. *Techniques d'exploitation pétrolière : Le gisement*. Éditions Technip.
- De Marsily, G., 2004. *Cours d'hydrogéologie*. Univ. Paris VI.
- Delannoy, J.-J., 1999. "Karst en Andalousie", livre collectif coordonné par Juan José Durán Valseo et Jerônimo Lopez Martinez. *Karstologia 34, 62–62.*
- Duchemin, É., 2002. *Robert Kandel, Le réchauffement climatique : Le grand risque*. Presses Universitaires de France, Collection Que sais-je, 127 p., 2002. *Vertigo- Rev. Électronique En Sci. Environ.*
- Duparc, L., Amstutz, A., 1932. *Sur la classification des gîtes métallifères*. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitteilungen 12, 5–26.*
- Gastou, M., n.d. *Le charbon*.
- Grabazhev, A., AI, G., PV, P., 1972. *Relation entre la métasomatose, les Métasomatites métallifères des gisements hydrothermaux pneumatolytiques et les granitoides d'oural*.
- Holtz, R.D., Kovacs, W.D., 1991. *Introduction à la géotechnique*. Presses inter Polytechnique.
- Jébrak, M., Marcoux, É., *faune, Q. (Province) M. des ressources naturelles et de la, Québec, G., 2008. Géologie des ressources minérales. Ministère des ressources naturelles et de la faune.*
- Karaouet, M., Djoudi, K., Lekoui, A.E., 2020. *Etude de synthèse bibliographique sur les skarns du Nord-Est Algérien et leurs potentiels miniers (PhD Thesis)*. Université de Jijel.
- Olivier, A., 2015. *Chimie et pollutions des eaux souterraines*. Lavoisier.
- Orcel, J., 1954. *La métallogénie*. *Bull. Minéralogie 77, 573–597.*
- Recordon, E., 1980. *Géotechnique routière et Terrassements*. STR U Verk. 66.
- Routhier, P., 1958. *Sur la notion de "types" de gisements métallifères*. *Bull. Société Géologique Fr. 6, 237–244.*

Sallé, C., Debyser, J., 1976. Formation des gisements de pétrole : étude des phénomènes géologiques fondamentaux. Editions Technip.

Trabelsi, R., Zaïri, M., Smida, H., Dhia, H.B., 2005. Salinisation des nappes côtières : cas de la nappe nord du Sahel de Sfax, Tunisie. *Comptes Rendus Geosci.* 337, 515–524.