



المسيلة في 09 يولي 2022

شهادة موافقة علمية على مطبوعة بيداغوجية
للأستاذ خضور جمال - أستاذ محاضر أ -

يشهد رئيس المجلس العلمي لكلية العلوم بجامعة محمد بوضياف بالمسيلة ، أنه بعد الإطلاع

على تقارير الخبرة الواردة من طرف الخبراء من صف الأستاذية :

- السيد حسيني مسعود، أستاذ التعليم العالي بجامعة ورقلة

- السيد حجاب مخلوفي، أستاذ التعليم العالي بجامعة محمد بوضياف- المسيلة.

والمعينين طرف المجلس العلمي لكلية العلوم في الاجتماع المنعقد في دورته العادية يوم

2021/11/18 لإجراء الخبرة للمطبوعة البيداغوجية الخاصة بالأستاذ خضور جمال - أستاذ

محاضر- أ- بقسم علوم الطبيعة و الحياة و المعنونة بـ «Géologie» والمقررة في برنامج التكوين

السنة الأولى جذع مشترك ميدان علوم الطبيعة و الحياة بكلية العلوم، قد تمت الموافقة عليهما

شكلا ومضمونا.

رئيس المجلس العلمي لكلية العلوم



أ. فاطم نيش

1985



جامعة محمد بوضياف - المسيلة
Universit Mohamed Eoudiel - M'Sila

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

جامعة محمد بوضياف- المسيلة

كلية العلوم

المسيلة في 2022-06-08

رقم : 2022 / 60

شهادة نشر دروس علمي بالخط
(خاص بملف الترشح للأستاذية أو التأهيل الجامعي)

بناء على إشهاد خلية التعليم الإلكتروني بجامعة محمد بوضياف بالمسيلة, وبعد الإطلاع على مصادقة الهيئة العلمية تشهد بأن الأستاذ(ة) : **جمال خضور** قام (ت) بنشر دروس على أرضية التعليم عن بعد **Moodle** , وفق المعايير التقنية والبيداغوجية المعتمدة للتدريس عبر الخط للمقرر الدراسي : **Géologie** , مستوى : السنة الأولى جذع مشترك ميدان علوم الطبيعة والحياة بكلية العلوم.

رئيس المجلس العلمي لكلية



ر. فاتم ميش

نائب العميد المكلف بالدراسات
والمسائل المرتبطة بالطلبة

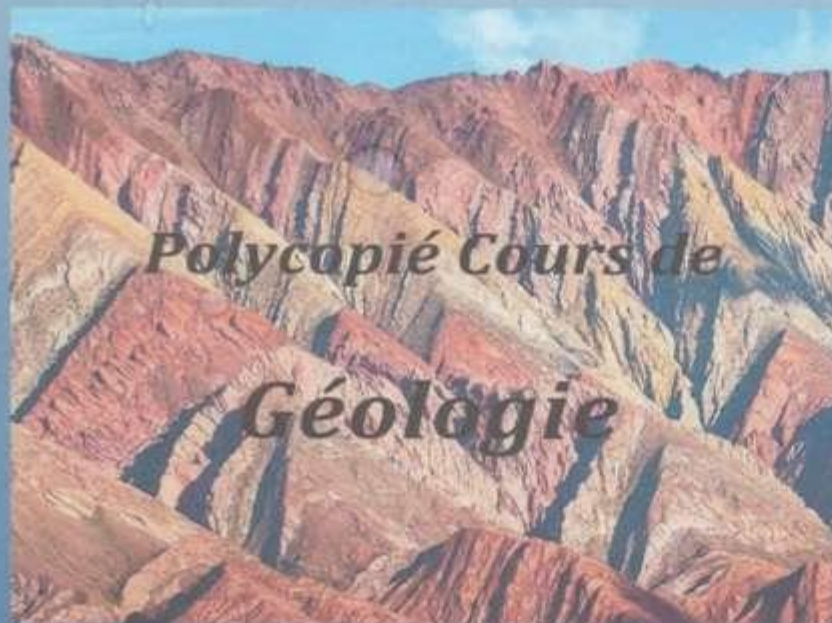


برصنيل عبر البريد

أصدرت هذه الشهادة طلب من المعني لإستعمالها في حدود ما يسمح به القانون .

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed BOUDIAF - M'sila
Faculté des Sciences
Département des Sciences de la Nature et de la Vie
Socle commun du domaine : SNV



Déstiné aux étudiants de 1ere année Socle commun L1 Domaine des
Sciences de la Nature et de la Vie

Présenté par : *Dr. Djamel KHOUDOUR*

Grade : Maître de Conférences « A »
Enseignant-Chercheur au Département de Sciences de la Nature et de la Vie
Faculté des Sciences - Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Année Universitaire 2021-2022

Sommaire

	Page
• Listedesfigures	i
• Listedestableaux	iii
• Listedesphotographies	iv
• Programme degéologieselonlecanevsdeformationen vigueur	v
Avant-propos	
ChapitreI:Géologiegénérale	
Introduction.2	
Qu'est-cequelaGéologie?	3
Intérêtdelagéologie.	3
Lagéologieetsesdifférentesbranches.	4
Géologie–Biologie:Intérêtl'unepourl'autre.	7
Lesméthodesdelagéologie.8	
Lesprincipesdelagéologie.	9
Leglobeterrestre.	9
Introduction.	9
Caractéristiquesdela Terre.	10
Forme.	10
LaTerreenchiffres.	11
Structuredela terre.	12
Introduction.	12
StructureexternedelaTerre:Enveloppesexternesdela Terre.	12
Magnétosphère.	12
AtmosphèreetHydrosphère.	13
Biosphère.	15
StructureinternedelaTerre:Enveloppesinternesdela Terre.	15
Introduction.	15
Lescouchesde compositionschimiques différentes.	16
Lescouchesdepropriétésphysiquesdifférentes.	19
ChapitreII:Géodynamiqueexterne	
Introduction.	23
Erosion(Dénudation).	23
Définitions.	23

Causes/facteurs de l'érosion.	24
Mécanisme d'érosion.	24
Types d'érosion.	24
Érosion mécanique ou physique.	24
Érosion chimique.	25
L'action de l'eau.	25
L'action du vent.	26
Érosion liée aux différences de température.	26
Érosion causée par les êtres vivants.	
26II.3. Altération (Météorisation).	27
Définitions.	27
Types d'altération.	27
Altération mécanique ou physique.	27
Altération chimique.	28
Dépôts.	29
Définitions.	29
Origine des sédiments.	29
Milieux de dépôt (Sédiment).	30
Principaux milieux de dépôt (Sédimentation).	30
Les milieux continentaux.	30
Les milieux marins.	30
Les milieux intermédiaires.	30
Différents types de sédimentation.	31
Les roches sédimentaires.	31
Notions sur les roches et les minéraux.	31
Définition des roches sédimentaires.	36
Étapes de formation d'une roche sédimentaire.	36
Les propriétés des roches sédimentaires.	37
Le cycle sédimentaire.	37
Classification des roches sédimentaires.	38
Méthodes d'études.	39
Définitions.	39
Chronologie relative.	40
Les méthodes stratigraphiques.	40

Les méthodes paléontologiques.	46
Chronologie absolue.	48
Principes de datation radiométrique.	48
Méthodes de datation des périodes anciennes.	49
Une méthode de datation des périodes récentes: Méthode au 14C.	50

Chapitre III: Géodynamique interne

Sismologie.	52
Étude des séismes.	52
Définitions.	52
Enregistrement et étude d'un séisme.	53
Propagation des ondes sismiques.	54
Localisation d'un tremblement de terre à la surface de la planète.	55
Les méthodes d'étude des séismes.	56
Classification des tremblements de Terre.	57
Données sismologiques et la structure interne du globe.	58
Causes des séismes.	59
Effet d'un séisme.	60
Origine et répartition des tremblements de terre?	60
Origine des tremblements de terre?	60
Répartition des tremblements de terre.	61
Tectonique souple et cassante (plis et failles).	64
Introduction.	64
La déformation des roches.	64
La déformation cassante des roches: Les failles.	64
La déformation souple des roches: Les plis.	67
Volcanologie.	69
Les volcans.	69
Introduction.	69
Qu'est-ce qu'un volcan?	70
Les structures de Volcan.	70
Fonctionnement d'un volcan.	70
Comment se forme un volcan?	71
Matériaux rejetés par les volcans.	71
Classification des volcans.	72

La prévention des risques volcaniques.	72
Origines du volcanisme.	73
Répartition des volcans.	73
Les roches magmatiques.	75
Introduction et caractères généraux des magmas.	75
Définitions.	75
Caractères généraux des magmas.	75
Remontées magmatiques.	76
Caractères d'un magma.	77
III.2.1.1.5. Caractéristiques minéralogiques.	77
III.2.2.1.6. Les grands types de magma.	77
Les roches magmatiques.	78
Définitions.	78
Composition chimique.	78
Composition minéralogique.	78
Les propriétés des roches magmatiques.	78
Classification des roches magmatiques.	79
Modes de mise en place des roches magmatiques.	80
Latectonique des plaques.	82
Introduction.	82
La dérive des continents.	82
L'expansion océanique (expansion des fonds océaniques).	83
Tectonique des plaques: « Tout bouge en profondeur, tout change en surface.	83
Les trois types de frontières.	84
A quel rythme se font ces mouvements de divergence et de convergence.	89
Déplacements des plaques sur la sphère.	89
Déplacements des 12 plaques.	89
Sismicité et tectonique des plaques.	90
Subduction et dorsale.	90
Les principales plaques lithosphériques et leurs frontières.	90

TRAVAUX PRATIQUES

I. Topographie.	94
Introduction.	94
La carte topographique.	94

Les informations les plus importantes qu'on trouve sur une carte	
Topographique.	95
Lecture de la carte.	95
Les coordonnées géographiques.	97
Le système d'orientation.	98
Les modes de représentation du relief sur les cartes topographiques.	99
Le profil topographique.	102
Définition.	102
Principe de l'exécution d'un profil topographique.	102
II. Carte et coupe géologique.	104
La carte géologique.	104
Introduction.	104
Définitions.	104
Présentation générale de la carte géologique.	105
La coupe géologique.	110
Définition.	110
Démarche à suivre: Principe de l'exécution d'une coupe géologique.	110
Représentation des figurés.	111
III. Roches et minéraux.	114
Les minéraux.	114
Définition.	114
Caractéristiques des minéraux.	114
Classification des minéraux.	116
Les roches.	117
Définition.	117
Classification des roches.	117
 Références bibliographiques	

Listedesfigures

	Page
Figure1	3
Figure2	7
Figure3	8
Figure4	10
Figure5	10
Figure6	12
Figure7	13
Figure8	14
Figure9	15
Figure10	16
Figure11	18
Figure12	21
Figure 13	21
Figure14	25
Figure15	27
Figure16	31
Figure 17	33
Figure18	37
Figure19	37
Figure20	42
Figure 21	47
Figure22	48
Figure 23a	51
Figure23b	52
Figure24	53
Figure25	54
Figure26	55
Figure27	55
Figure28	55
Figure29	55
Figure30	56
Figure31	59
Figure32	61
Figure33	64
Figure34	65

Figure35	Lesdéplacementshorizontauxdecouches.	65
Figure36	Lesdéplacementsverticauxde couches.	66
Figure37	LesdéplacementsverticauxdecouchesGrabenet Horst.	67
Figure38	Lesprincipauxélémentspermettantdedécrireunestructure plissée.	68
Figure39	Différentstypesdeplisselonl'inclinaisondesflancsetdelasurface axiale.	69
Figure40	Schémastructurald'un volcan.	70
Figure41	Formationd'un volcan.	71
Figure42	Distributiondesvolcanssurlaplanète.	74
Figure43	Différentstypesdetexturedesrochesmagmatiques.	80
Figure44	Principauxmodesdegisementdesroches magmatiques.	81
Figure45	Lemodèle delatectonique des plaques.	84
Figure46	Lesprincipalesplaqueslithosphériquesetleursfrontières.	91
Figure47	Modèledelatectoniquedesplaquesetladérivedescontinents.	92
Figure48	Principed'établissementdescourbes.	98
Figure49	Différentstypesdecourbesde niveau.	100
Figure50	Réalisationduprofiltopographique.	102
Figure51	Passagelatéralde faciès.	105
Figure52	Exemplesdefigurés(habillage des couches).	110
Figure53	Représentationdesfigurés(terrainssédimentaires/cristallins).	111
Figure54	Représentationtyped'unecoupegéologique.	112

Listedestableaux

	Page
Tableau1	Comparaisonentrelacroûtecontinentaleetlacroûteocéanique. 26
Tableau1	Comparaisonentrelacroûtecontinentaleetlacroûteocéanique. 17
Tableau2	Principauxélémentschimiquesquicomposentlacroûte terrestre. 17
Tableau3	Classificationdesrochessédimentairesd'originedétritique. 37
Tableau4	Echellestratigraphiqueetprincipalesextinctionsbiologiquesmajeures.45
Tableau5	Lesfossiles,outilsde datation. 47
Tableau6	Comparaisonentrelesdeuxméthodesd'étudedes séismes. 57
Tableau7	Observationdeseffetsdesséismesurlespersonnes,surlesobjetset surdommagesauxconstructions selonl'intensitéetlamagnitude. 63
Tableau8	Reconnaissanced'unplisurlacarte géologique. 67
Tableau9	Vitessededéplacementdes12grandesplaquestectoniques. 91
Tableau10	Durétédes minéraux 113
Tableau11	Classificationdesminéraux 116

Listedesphotographies

	Page	
Photographie1	Straterenfermanhydrocarbures(pétrole)	4
Photographie2	Cristauxdequartz	4
Photographie3	Exemple d'une collaboration scientifique biologie/géologie (les oursins)	8
Photographie4	Exemple d'une collaboration scientifique biologie/géologie (les oursins)	90

Programme de géologie selon le canevas de formation en vigueur

Semestre: 1

UE Découverte

Matière: GEOLOGIE

- **Objectifs de l'enseignement** Étudier les constituants et la structure du globe terrestre, les interactions entre ces constituants, la géodynamique externe et interne.

Contenu de la matière:

1. GEOLOGIE GENERALE

- Introduction
- Le globe terrestre
- Lacroûte terrestre
- Structure de la terre

2. GEODYNAMIQUE EXTERNE

Erosion

L'action de l'eau

L'action du vent

Dépôts

Méthodes d'études

Les roches sédimentaires

Notion de stratigraphie

Notion de paléontologie

3. GEODYNAMIQUE INTERNE

SISMOLOGIE

Étude des séismes

Origine et répartition

Tectonique souple et cassante (plis et failles)

VOLCANOLOGIE

Les volcans

Les roches magmatiques

Étude des magmas

LATECTONIQUE DES PLAQUES

4. INTITULE DESTP:

Topographie

Géologie (Coupes)

Roches et minéraux

Mode d'évaluation:

Control continue + examen de courte durée

Références (*Livres et photocopiés, sites internet*)

Avant-propos

Ce cours, conformément à l'intitulé de la matière, ne concerne que la géologie de manière précise, adressé aux étudiants de première année Tronc commun du domaine de sciences de la nature et de la vie, Filière: Sciences biologiques et qui s'intègrent dans la géologie générale selon les objectifs fixés et parmi lesquels : l'étude des constituants et la structure du globe terrestre, les interactions entre ces constituants, la géodynamique externe et interne. Cette matière est d'une importance vitale tant sur les plans scientifiques, qu'économiques ou technologiques.

Le cours a été élaboré au fur et à mesure en s'inspirant du contenu réglementaire du canevas de formation de ce tronc commun dont son harmonisation a été officialisée par arrêté ministériel n° 1156 du 09/08/2016 portant harmonisation des autres spécialités pour habilités au titre de l'Université de M'Sila pour le domaine « Sciences de la Nature et de la Vie » d'une part et de l'autre par un certain nombre d'ouvrages.

L'objectif premier de ce cours est d'offrir une synthèse scientifique et méthodologique de la géologie, en se basant sur les connaissances et les compétences acquises au lycée. Le deuxième objectif est d'assimiler la démarche scientifique. Pour ce faire, nous avons eu à cœur de présenter les moyens d'études et les données acquises sur le terrain, en laboratoire ou encore grâce à la modélisation. Le troisième objectif, et pas des moindres, est celui de développer votre curiosité et de vous transmettre notre passion commune de l'étude de la planète Terre. La passion de la matière, la passion de l'enseigner et de la transmettre.

Des illustrations sont très simples mais l'effort demandé à l'étudiant est immense surtout dans le système LMD où les lacunes de connaissance sont à combler avec la consultation d'une documentation surtout numérique assez accessible de nos jours.

Ce cours est appelé à être amélioré mais aucun écrit n'arrive à égaler une séance de travaux pratiques et surtout une sortie scientifique sur terrain pour une imprégnation des étudiants à la science qui s'intéresse à l'étude de la Terre, les matériaux qui la constituent, la structure de ces matériaux et les processus qui agissent sur eux : « ***La géologie*** ».

Dr Djamel KHOUDOUR

Chapitre I:
Géologie générale

Chapitre I: Géologie générale

Introduction

La Terre est la troisième planète du Système solaire par ordre de distance croissante au Soleil, et la quatrième par taille et par masse croissantes. Ils'agit de la plus grande et la plus massive des quatre planètes telluriques (rocheuses), les trois autres étant Mercure, Vénus et Mars. Généralement les Sciences de la Terre et de l'Univers regroupent les sciences dont l'objet est l'étude la Terre (lithosphère, hydrosphère et atmosphère) et de son environnement spatial; en tant que planète,

La Terre sert de modèle à l'étude d'autres planètes ditestelluriques. Depuis que des sondes spatiales permettent d'explorer d'autres objets du système solaire.

La Géologie étudie aussi la Lune, les planètes et leurs satellites naturels, les astéroïdes, les météorites et les comètes. On parle plus généralement des Sciences de la Terre et de l'Univers. La Terre se trouve dans la zone habitable du Système solaire; elle est principalement composée de fer (32,1%), d'oxygène (30,1%), de silicium (15,1%), de magnésium (13,9%), de soufre (2,9%), de nickel (1,8%), de calcium (1,5%) et d'aluminium (1,4%), le 1,2% restant consistant en de légères traces d'autres éléments.

La biosphère désigne toutes les formes de vie de la planète. La notion de biosphère désigne à la fois un espace vivant et un processus dynamique sur la planète Terre (depuis l'apparition de la vie il y a environ 4 milliards d'années jusqu'à ce jour).

L'hydrosphère est un terme désignant l'ensemble des zones d'une planète où l'eau est présente. Il s'agit de l'eau sous sa forme liquide (océans, fleuves, eaux souterraines..), sous forme solide (glaciers, banquise...) ou sous sa forme gazeuse (vapeur d'eau).

Le cycle géologique c'est l'enchaînement de phénomènes internes d'orogénèse (Formation de montagnes) et de phénomènes externes d'érosion/sédimentation, la durée se mesure en dizaines voire centaines de millions d'années, au cours de chaque cycle des reliefs ont surgi à la surface du globe, puis ont été érodés jusqu'à être aplanis (supprimés).

La géodynamique interne s'intéresse aux processus internes de la planète qui ont été à l'origine de la formation des océans et des grandes chaînes de montagnes.

La géodynamique externe s'occupe de l'évolution dynamique de la surface de la Planète. Elle s'intéresse aux paysages obtenus par les processus d'érosion et de sédimentation dans les océans, souvent causés par l'eau, la glace et le vent. Il existe un lien certain entre géodynamique interne et géodynamique externe : la dynamique reliée à la

tectonique des plaques viennent souvent rejoindre les reliefs des continents.

Qu'est-ce que la Géologie?

La **géologie** (du grec ancien *gê*, la Terre, et *Logos*, le discours). La géologie est la science qui étudie la Terre dans ses différentes parties directement accessibles à l'observation, s'efforçant de reconstituer leur histoire par l'étude de leur agencement. Elle traite avec d'autres sciences associées de la composition, de la structure, de l'histoire et de l'évolution des couches internes et externes du globe terrestre, et des processus qui la façonnent. La géologie est une discipline importante parmi les sciences de la Terre. Elle se base en premier lieu sur l'observation, puis elle établit des hypothèses permettant d'expliquer l'agencement des roches et des structures les affectant afin d'en reconstituer l'histoire (**Hacinet al., 2020**).

La **géologie** est la science qui a pour objet l'histoire naturelle de la terre, la connaissance de la forme extérieure du globe, l'étude des différents terrains, celle de leur formation et de leur position actuelle.

***Géologue :** Le géologue est un homme ou une femme de science et de terrain qui étudie la Terre en surface et en profondeur. La **géologie** étudie la Terre du point de vue : Composition, structure et évolution.

*** Objet:** Reconstituer l'histoire de la Terre.

*** Démarches:** -L'Observation, la description et l'interprétation.

La **Terre** est une planète qui évolue depuis sa naissance il y a 4,56 milliards d'années. Les processus internes (volcanisme, séismes, tectonique des plaques..) et externes (érosion, sédimentation) ainsi que ceux liés à la vie remodelent sans cesse la surface de la Terre. La géologie tente de retracer l'évolution de la Terre depuis sa naissance et d'expliquer l'ensemble des processus qui modèlent sa surface.

Intérêt de la géologie:

La géologie est une science d'une importance majeure tant sur les plans scientifiques, qu'économiques ou technologiques.

Surface de la Terre, il y a 4,6 milliards d'années, avant l'apparition et le développement du vivant (Source: Graïne, 2018).



• **Intérêt scientifique:** Elle permet de connaître l'histoire de la Terre depuis sa formation et tente de prévoir son avenir.

• **Intérêt économique :** Les matières premières (fer, cuivre, argent, or...), énergétiques (pétrole, gaz, charbon..) et les matériaux de construction (pierres, chaux, gypse,...) sont extraits de la Terre ou fabriqués à partir de matériaux extraits de la surface de la Terre.



Photographie 1. Straterenfermant hydrocarbures (pétrole)



Photographie 2. Cristaux de quartz (Ici, pierres précieuses)

(Source: Pierre, 2008).

La recherche et l'exploitation de ces matériaux nécessitent une connaissance préalable en géologie. Connaissant l'importance de ces matériaux dans la vie quotidienne et en économie, on conçoit l'intérêt majeur de la géologie.

La recherche et l'exploitation de l'eau, source vitale pour l'humanité, nécessitent également de bonnes connaissances en géologie étant donné que cette substance est extraite du sous-sol.

• **Intérêt technologique :** La construction des ouvrages d'arts (routes, ponts, tunnels, barrages ...), des villes, des usines, des ports ..., nécessite une connaissance en géologie. Aucune construction ne peut se faire sans une étude préalable du sol (ce qui fait intervenir la géologie en premier plan) sur lequel sera bâti l'ouvrage.

• **Les risques et catastrophes naturels :** Les connaissances en géologie sont primordiales pour étudier et prévoir les catastrophes naturelles telles que séismes, éruptions volcaniques, glissements de terrains, inondations

Lagéologie et ses différentes branches (Différentes disciplines de la géologie, sciences apparentées = Sciences géologiques):

La géologie est *une science multidisciplinaire* (comporte de nombreuses disciplines scientifiques). On distingue (figure 2) :

- L'étude des roches, matériaux de base qui constituent la surface de la Terre, s'appelle :

Pétrographie (pétrologie = lithologie).

- Les roches sont constituées de minéraux, qui sont composés d'un ou plusieurs éléments chimiques. La branche de la géologie qui s'occupe de l'étude des minéraux est la **minéralogie**. Tous les minéraux sont des cristaux. L'étude des propriétés de la matière cristalline s'appelle : **crystallographie**.

- La branche qui s'occupe de l'étude des volcans est la **volcanologie** (ou **ouvulcanologie**).

- Les processus d'érosion suivie du transport et du dépôt des sédiments sont très importants à la surface de la Terre. L'étude de ces processus s'appelle : **sédimentologie**.

- Les roches sédimentaires se présentent le plus souvent à la surface de la Terre sous forme de couches ou de strates. La description de ces couches ou strates est l'objet de la **stratigraphie**.

- La **pédologie**, qui est la science des sols. La pédologie permet de planifier l'agriculture et avoir une idée sur les richesses du sous-sol.

- Les roches sédimentaires contiennent souvent des fossiles, trace, restes ou moulages d'organismes conservés dans les roches. La **paléontologie** (paléo est un préfixe qui veut dire ancien) est la branche qui s'occupe de l'étude de ces fossiles. Elle est divisée en trois parties selon la nature de l'organisme à étudier. On distingue ainsi : la **paléozoologie** qui étudie les animaux fossiles ; la **paléobotanique** pour les plantes fossiles et la **micropaléontologie** pour l'étude des micro-fossiles.

- Les matériaux (roches, minéraux) sont souvent déformés à la surface de la Terre (exemple : dans les chaînes de Montagnes). La branche qui étudie la déformation des matériaux à la surface de la Terre s'appelle : **tectonique**. L'étude de la tectonique à l'échelle du minéral (petite échelle) s'appelle : **micro-tectonique**. A l'échelle des roches et des affleurements rocheux, on passe à la **géologie structurale**. L'étude de la tectonique à l'échelle de la Terre s'appelle **tectonique globale**.

- L'étude du comportement chimique des éléments dans les roches s'appelle : **géochimie**.

- L'utilisation des méthodes de la physique pour l'étude de la Terre s'appelle : **géophysique**.

On distingue plusieurs branches en géophysique : l'étude des séismes et de la propagation des ondes sismiques s'appelle **séismologie** (ou **sismologie**). Le **génie sismique**, qui s'occupe d'études macrosismiques sur le terrain à la suite d'un tremblement de terre de quel qu'importance; il s'occupe aussi d'évaluer le risque sismique et de fixer des normes parasismiques pour un pays ou une région donnés ; il participe aussi à la

régions à risque et, si possible, essaye de prévoir des tremblements de terre futurs, soit par des méthodes statistiques, soit par des méthodes déterministes lorsque c'est possible. L'étude de la pesanteur ou du champ de gravité de la Terre s'appelle : **gravimétrie**. L'étude du magnétisme terrestre fait également partie de la géophysique. Le **paléomagnétisme** est la branche de la géophysique qui étudie le magnétisme ancien de la Terre. La **géodésie**, qui étudie la forme et les dimensions de la Terre.

- La **géomorphologie** est une branche de la géologie qui s'occupe de l'étude de la forme et de l'évolution du relief à la surface de la Terre. La reconstitution des paysages du passé est la **paléogéographie**.

- L'application pratique (dans les domaines pétrolier, minier, hydraulique et en construction) des différentes branches de la géologie s'appelle : **géologie appliquée**. On distingue :

* **La géologie pétrolière**: qui s'occupe de l'étude de la formation et la recherche des hydrocarbures.

* **La métallogénie**: qui étudie l'origine des gisements minéraux.

* **L'hydrogéologie**: qui s'occupe de la recherche et de l'exploitation des eaux souterraines.

* **La géologie de l'ingénieur**: qui est l'application de la géologie dans le domaine de l'ingénierie civile.

L'étude des sols est la **géotechnique**.

- **La géologie de l'environnement** est une branche qui s'occupe de l'étude de l'environnement en relation avec la géologie.

- **La planétologie** est une branche récente de la géologie qui s'occupe de l'étude de la géologie des planètes.

- La **glaciologie**, qui étudie l'eau sous sa forme solide, la glace et sa présence massive à la surface de la Terre sous forme de glaciers ou de banquise.

- La **spéléologie** concerne l'étude des cavités naturelles, le plus souvent en zone karstique; cette étude englobe la connaissance géologique du terrain encaissant.

- La **géochronologie**, qui étudie les sédiments archéologiques et les dépôts d'âge quaternaire.

- **L'exogéologie** ou **astrogéologie**, qui grâce à des méthodes de télédétection, à l'expérimentation *in situ* ou en laboratoire et au prélèvement d'échantillons, étudie la composition, la structure et l'histoire de la surface des planètes du système solaire et de

leurs satellites naturels; on parle également de géologie planétaire.

Ainsi, on remarque que certaines branches de la géologie font appel à d'autres disciplines telles que la physique (en géophysique), la chimie (en géochimie), la biologie (en paléontologie), l'astronomie (en planétologie)...

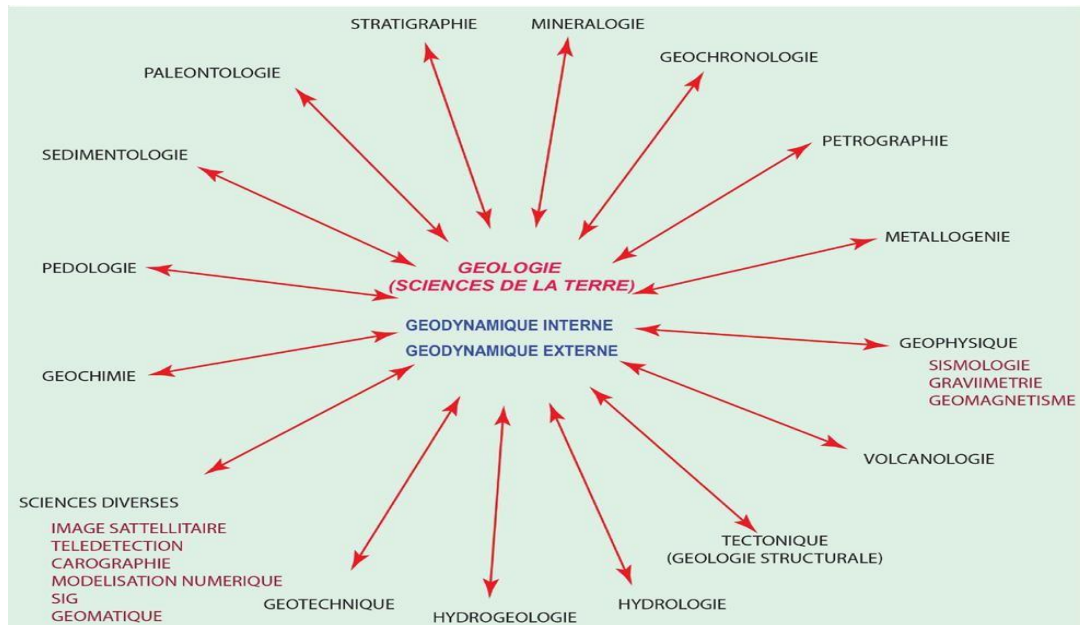


Fig.2. Différentes disciplines de la géologie (Source: Moadet al., 2015).

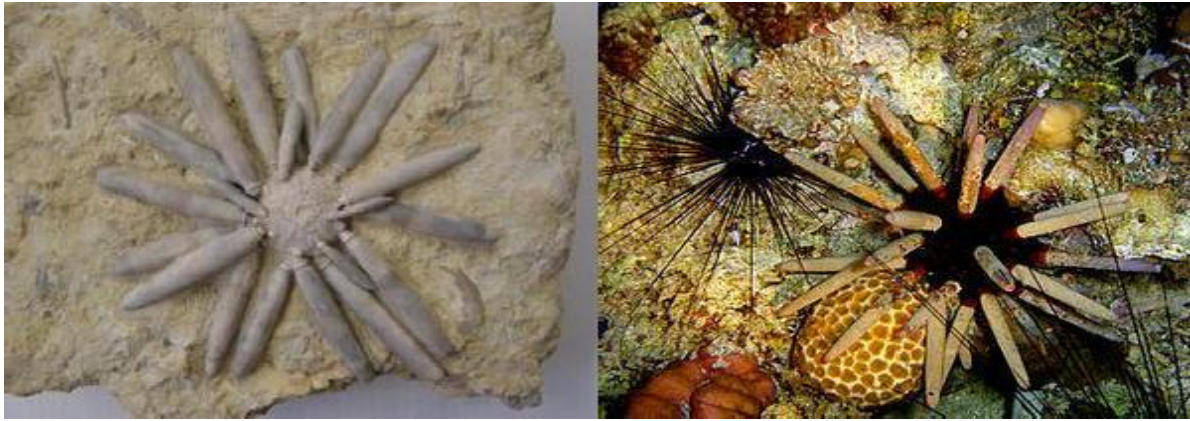
I.1.5. Géologie-Biologie: Intérêt l'un pour l'autre

La géologie et la biologie sont toutes deux des sciences de la Nature. *Définition simple de « Nature » : Ensemble de tout ce qui forme l'Univers sans intervention humaine. Par exemple, les océans, les montagnes, les êtres vivants font partie de la Nature ; les villes, les autoroutes... ne font pas partie de la Nature (Graine, 2018).*

La *biologie* étudie le monde du Vivant ou organique. La *géologie* s'intéresse au monde inorganique et en premier lieu aux **roches** et à ses composants : **minéraux**, **cristaux**, **fossiles**. Les fossiles sont des restes d'animaux et de végétaux, donc d'anciens organismes qui ont vécu il y a des millions d'années et qui ont disparu, parfois totalement de nos jours. Exemple le plus connu : les dinosaures.

La **paléontologie**, science qui étudie les fossiles se trouve à la jonction de la biologie et de la géologie.

Un exemple d'une collaboration scientifique biologie/géologie: L'étude d'un ours infossile (à gauche) qui a vécu il y a 20 millions d'années retrouvée dans une couche géologique. Il est totalement transformé en roche. Il ne reste plus la moindre particule organique.

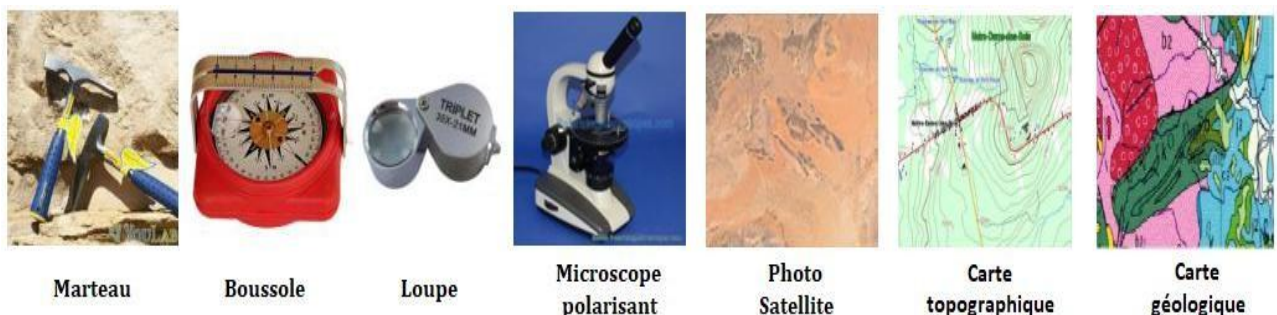


*A gauche: Oursin qui a vécu il y a quelques 20 millions d'années.
A droite: Oursin actuel.*

Le biologiste étudie l'organisme actuel qui présente de grandes similitudes avec l'oursin fossile. En donnant le genre, l'espèce et l'environnement, il apporte une aide précieuse au géologue qui va retrouver les conditions géologiques de l'époque (ici une vingtaine de millions d'années). On dit qu'il remonte le temps géologique. Par ailleurs, les fossiles emprisonnés dans les couches, ou **strates**, permettent de subdiviser le temps. La paléontologie a permis l'élaboration d'une sorte de calendrier géologique dite «Echelle des temps géologiques » ou « Echelle stratigraphique ». Cette dernière représente un outil scientifique indispensable aux géologues.

Les méthodes de la géologie

Une étude géologique classique passe par plusieurs étapes : la première consiste en une **étude sur le terrain** (Reconnaissance de la région, récolte d'échantillons, levés de cartes, prise de mesures ...). Sur le terrain, le géologue est muni, entre autres, d'un marteau de géologue, d'une boussole (aujourd'hui on utilise le GPS pour se localiser, mais la boussole reste indispensable), de loupes, de cartes topographiques et géologiques (utilisées aussi par les biologistes, géographes, urbanistes, architectes, archéologues...), de sacs d'échantillonnage, de marqueurs indélébiles, de carnets, de crayons de couleur...



Marteau

Boussole

Loupe

Microscope polarisant

Photo Satellite

Carte topographique

Carte géologique

Fig.3. Différents outils du géologue

La deuxième étape se déroule au **laboratoire** (analyse des échantillons), au **bureau** ou devant un micro-ordinateur (étude des photos aériennes et satellites, étude de documents existants, interprétation des mesures faites sur le terrain). La dernière étape consiste en la rédaction d'un **rapport géologique** détaillé sur l'étude qui a été réalisée ou la confection de cartes géologiques.

Les principes de la géologie :

La géologie est basée sur deux principes ou théories :

a- Le **principe de l'Uniformitarisme** ou **actualisme** qui stipule que le présent est la clé du passé dans l'interprétation des phénomènes géologiques. Ainsi, les lois régissant les phénomènes géologiques actuels étaient valables dans le passé. Ce principe est dû à James Hutton (1726-1797) qui l'énonça le premier et a été développé ensuite par Charles Lyell (1797-1875).

- Est un des principes de base de la géologie moderne. Il postule que les processus qui se sont exercés dans le passé lointain s'exercent encore de nos jours. L'adage « le présent est la clé du passé » résume la méthode qui en découle. Ce principe s'oppose au catastrophisme selon lequel les caractéristiques de la surface terrestre sont apparues soudainement dans le passé à partir de processus radicalement différents de ceux existant aujourd'hui.

b- La **théorie de la tectonique des plaques**, avancée pour la première fois par Alfred Wegener (1880-1930) en 1912 et acceptée par la communauté scientifique en 1969. Cette théorie stipule que la surface de la Terre est constituée de plaques rigides qui sont en mouvement les uns par rapport aux autres. La plupart des phénomènes géologiques (séismes, volcanisme, formation des chaînes de montagnes ...) sont expliqués dans le cadre de cette théorie.

Le globe terrestre

Introduction

- Nous vivons sur une boule rocheuse entourée par une mince couche d'air. Toute la vie terrestre est conditionnée par le Soleil.

- La Terre est la plus grande, la plus massive et la plus dense des planètes internes, la seule dont on connaisse une activité géologique récente et qui abrite la vie. Son hydrosphère liquide est unique parmi les planètes telluriques et elle est la seule planète où une activité tectonique a été observée. L'*atmosphère* terrestre est radicalement différente de celle des autres planètes, ayant été altérée par la présence de formes de vie pour contenir 21 % d'oxygène.

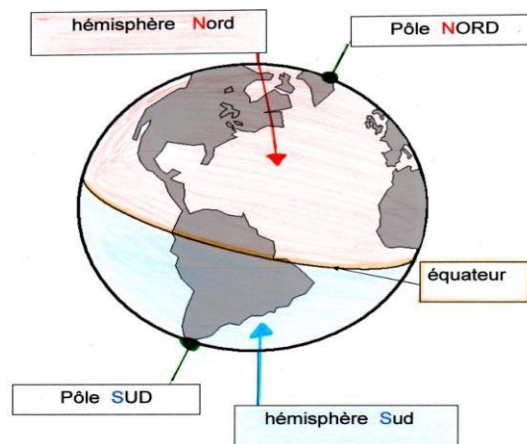


Fig.4. Globe terrestre simplifié

- La Terre est une **sphère qui tourne sur elle-même** autour d'un axe incliné par rapport à l'horizontale et qui passe par les **2 pôles**. *Le globe terrestre est une représentation de la Terre.*

- La Terre possède un satellite, la **Lune**, le seul satellite significativement grand des planètes telluriques du Système solaire. La période de révolution de la Terre, c'est-à-dire la durée de l'année, est d'environ 365,25 jours.

Caractéristiques de la Terre

Forme: La terre est comparable à un ballon ou à une orange: c'est un globe. Le globe ayant ses rayons équatoriaux et polaires différents, il est appelé ellipsoïde. C'est un ellipsoïde irrégulier (car les 2 hémisphères Nord et Sud ne sont pas symétriques) et est de ce fait appelé **géoïde**.

La forme de la Terre est modélisée par un **ellipsoïde**, légèrement aplati aux pôles, gonflée à l'équateur et précisée par le **géoïde**.

Géoïde: Surface équipotentielle du champ de pesanteur. Une excellente réalisation physique de cette équipotentielle est la surface moyenne des mers et océans.

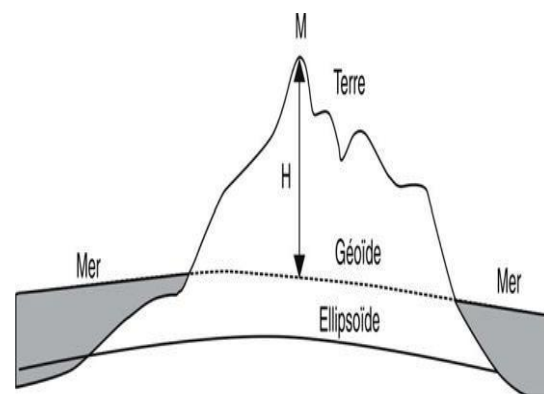


Fig.5. Géoïde est la forme théorique de la terre (Source : Junge, 1963).

On a naturellement choisi la **surface de niveau moyen des mers** comme origine des altitudes. En prolongeant cette surface sous les continents, on obtient le **géoïde**.

Ex. L'altitude d'un point est donc la distance verticale qui sépare ce point d'une surface théorique de référence, dite surface de niveau zéro ou **géoïde**.

La Terre en chiffres

a- Caractéristiques physiques:

Rayon équatorial: 6378.14 km.

Rayon polaire : 6356.78 km.

$$\implies \text{L'aplatissement (Ap): } Ap = \frac{Re - Rp}{Re} = \frac{1}{297} \approx \frac{1}{300}$$

Rayon moyen de l'orbite: 149,598.10⁶ Km.

Masse: 5,972.10²⁴ kg.

Volume de la Terre : 1000 milliards de Km³.

Âge: 4,54 milliards d'années.

Volume des océans: 1372. 10⁶ km³.

Distance du Soleil: 149 600 000 km

Masse des océans: 1,422. 10²⁴ kg.

Superficie: 510 072 000 km²

Volume de glace actuelle: 33. 10⁶ km³.

Superficie des continents: 148 326 000 km².

Masse de glace actuelle: 3. 10¹⁶ tonnes.

Superficie des océans: 361 740 000 km².

Gravité à la surface : 9.780 m/s².

Circonférence à l'équateur : 40 075 Km.

Circonférence aux pôles : 40 007 Km.

Période de rotation: 0.99727 ≈ 1 (Jours sidéral) = [23^h 56^{min} (4.084)s].

La Terre tourne autour de son axe → Le jour.

La Terre tourne autour du soleil (Période de révolution) →

L'année (365,25696 jours ≈ 365^h 58^{min}).

Densité moyenne: 5,52 (eau: 1)

Température moyenne de surface: 14°C.

Température, la plus basse : - 88,3°C → Antarctique.

Température, la plus élevée: + 57, → en Libye.

Inclinaison de l'axe: (23,45)°.

Le sommet le plus élevé: Le Mont Everest, 8848 m.

Fosse océanique la plus profonde actuellement connue: La fosse des Mariannes, -11022 m.

Population: 7,3 milliards (2015).

b- Caractéristiques de l'atmosphère:

La Terre se caractérise par son atmosphère, la présence importante d'océans à sa surface et des conditions favorables à la vie.

Pression atmosphérique: 101325 Pa ≈ 1,013 bars.

Composition de l'atmosphère: -Azote (N₂), 77%; -Oxygène (O₂), 21%;

Composition de l'atmosphère : -Azote (N₂), 77% ; -Oxygène (O₂), 21% ; -Autres, 2%:

Argon (Ar), 0.94% ; Vapeur d'eau (H₂O), 0.7% ; Dioxyde de carbone (CO₂), 0.039 %.

c- Caractéristiques orbitales: Satellites: La lune.

Structure de la Terre: Différents sphères de la Terre

Introduction

La connaissance directe de la structure de la Terre ne concerne que l'atmosphère, l'hydrosphère et la partie supérieure de l'écorce. L'investigation des couches profondes se fait indirectement par des déductions. Notre terre est constituée par une série d'enveloppes :

- Les *enveloppes externes*
 - Magnétosphère.
 - Atmosphère.
 - Hydrosphère.
 - Biosphère.
- Les *enveloppes internes*
 - Croûte terrestre
 - Manteau.
 - Noyau

Structure externe de la Terre: Enveloppes externes de la Terre

Magnétosphère

Notre planète génère son propre champ magnétique, un peu à la manière d'une gigantesque dynamo. C'est la différence de vitesse entre la rotation de la planète et son cœur liquide qui, par frottement, génère ce champ magnétique (Jault et al., 2010). La magnétosphère est l'ensemble des lignes de champ magnétique terrestre situées au-delà de l'ionosphère, au-dessus de 800 à 1000 km d'altitude.

La magnétosphère est plongée dans le vent solaire, et déformée par celui-ci : sa forme très allongée, comprimée du côté du soleil (coté jour) et étirée du côté nuit, un peu comme la queue d'une comète. En réalité la magnétosphère agit comme un écran et protège la surface terrestre des excès du vent solaire (Bombardement par des particules ionisées constituant ce flux issu du Soleil), nocif pour la vie (Figure 6).

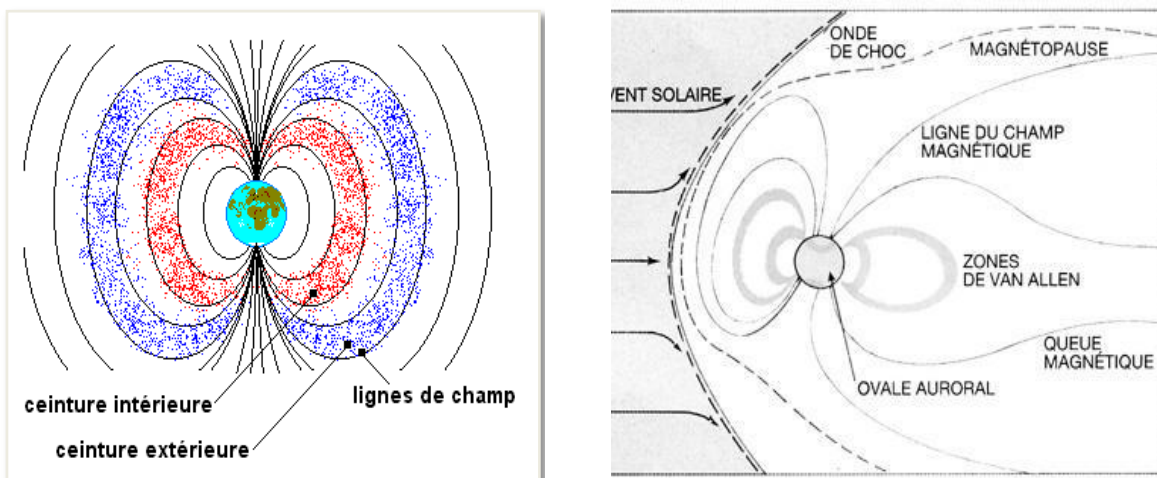


Fig.6. Magnétosphère de la Terre.

La Terre est une planète entourée de deux enveloppes fluides: **L'atmosphère**, enveloppe gazeuse qui existe sur toutes les planètes sauf Mercure, et **l'hydrosphère**, enveloppe liquide discontinue, essentiellement constituée d'eau, et qui est l'une des originalités de la Terre « Planète Bleue ».

Atmosphère et Hydrosphère

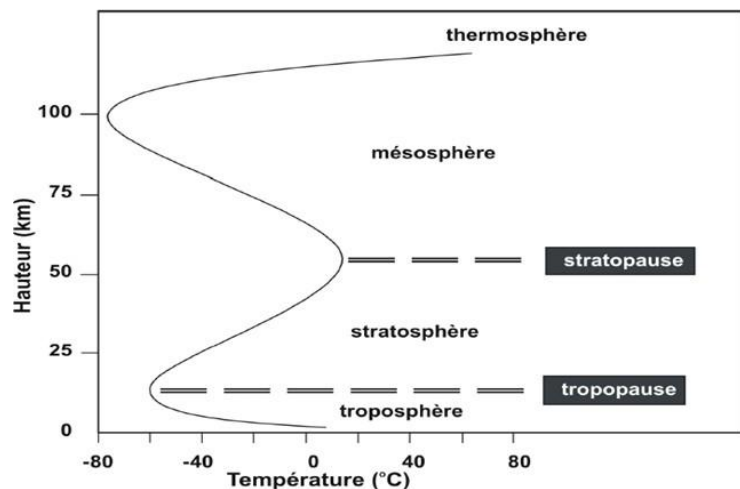
A- Atmosphère: (du grec. *atmos*= vapeur et *sphaira*= sphère). L'atmosphère terrestre désigne l'enveloppe gazeuse entourant la Terre solide.

L'enveloppe gazeuse de la terre, environnement dans laquelle la vie subsiste, correspond à la "sphère" la plus dynamique et instable de cette planète. Ce milieu contrôle la distribution de l'énergie à la surface du globe, et beaucoup de transformations chimiques, en particulier d'origine photochimique, surviennent à ce niveau.

De plus, c'est là que s'effectuent les échanges de matière (et d'énergie) avec le reste du système solaire et l'espace en général. D'autre part, il est en contact très étroit avec les océans, la biosphère terrestre et la lithosphère, et fonctionne comme un milieu de transfert de matières d'une sphère à l'autre.

L'air sec se compose de 78,084% de diazote (N_2), 20,95% de dioxygène (O_2), 0,93% d'argon (Ar), de < 0.5% à ~ 5% Vapeur d'eau (H_2O) -très variable-, 0,039% de dioxyde de carbone (CO_2) et des traces d'autres gaz comme : Néon (Ne), Hélium (He), Méthane (CH_4), Krypton (Kr), Dihydrogène (H_2), Xénon (Xe),.....

L'azote, l'oxygène et l'argon constituent la majeure partie. En pourcentage, le volume de ces gaz, reste constant dans l'atmosphère jusqu'à une hauteur voisine de 100 Km. Cependant, à l'échelle des temps géologiques, la quantité d'oxygène n'est pas restée constante, ce gaz étant impliqué dans les processus du monde vivant et d'autres interactions chimiques.



Parmi les moins abondants, les gaz nobles, **Ne, He, Kr** et **Xe** apparaissent aussi en quantité bien déterminée. D'autres gaz mineurs parmi lesquels les principaux sont la vapeur d'eau (H_2O), Méthane (CH_4), Dioxyde de carbone (CO_2) et Dihydrogène (H_2), montrent des concentrations variables dans l'espace et dans le temps.

Les sources et origines de la plupart des composants gazeux se situent à la surface de la Terre ou de la mer, souvent par l'intermédiaire de la biosphère et de l'activité biologique. C'est le cas pour le dioxyde de carbone, l'oxygène et la vapeur d'eau, comme la plupart des gaz d'origine anthropique et les gaz à effet de serre tel le méthane.

L'atmosphère protège la vie sur Terre en absorbant le rayonnement solaire ultraviolet, en réchauffant la surface par la rétention de chaleur (effet de serre) et en réduisant les écarts de température entre le jour et la nuit.

B-Hydrosphère: (du grec. *hudor*=eau et *sphaira*=sphère).

- Est un terme désignant l'ensemble des zones d'une planète où l'eau est présente. Elle concerne aussi bien l'eau sous forme liquide (océans, fleuves, lacs, les cours d'eau, eaux souterraines.....), que sous forme solide (glaciers, banquise...) ou sous forme gazeuse (vapeur d'eau). (<https://fr.wikipedia.org/wiki/Hydrosph%C3%A8re>)
- C'est la totalité des eaux de la Terre (océans, fleuves, lacs, les cours d'eau, eaux souterraines...).

⊗ **Cycle de l'eau (cycle hydrologique)**

Est un modèle représentant le parcours entre les grands réservoirs d'eau liquide, solide ou de vapeur d'eau sur Terre: les océans, l'atmosphère, les lacs, les cours d'eau, les nappes d'eaux souterraines et les glaciers. Le « moteur » de ce cycle est l'énergie solaire qui, en favorisant l'évaporation de l'eau, entraîne tous les autres échanges.

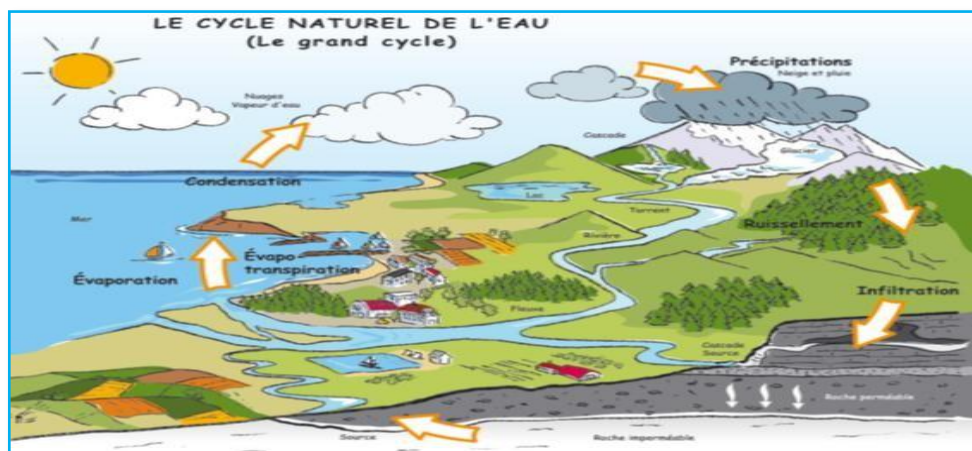


Fig.8. Le cycle de l'eau
(Source: Djerrab, 2018)

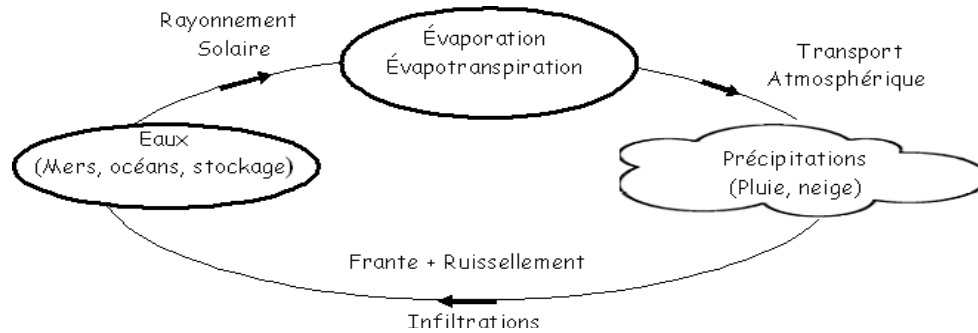


Fig.9. Cycle d'eau simplifié

Sous l'effet du rayonnement solaire, l'eau des océans et des surfaces terrestres passe en phase gazeuse et s'élève dans l'atmosphère (Fig.9) où elle se condense sous forme de gouttelettes (Gilliet *al.*, 2004).

Biosphère

Couche idéale qui forme autour de la croûte terrestre l'ensemble des êtres vivants. Elle dépend étroitement de l'énergie solaire et elle comprend : la partie inférieure de l'atmosphère, la partie de l'hydrosphère et la partie supérieure de la lithosphère.

La biosphère répond à la grande distinction entre le monde vivant et le monde inerte.

Elle comprend l'ensemble des êtres vivants et elle se concentre à l'interface entre atmosphère et hydrosphère ou la surface des continents. Mais la biosphère est néanmoins également présente au sein de la lithosphère au moins jusqu'à une profondeur de quelques kilomètres sous forme microbienne, et au sein de l'hydrosphère et de l'atmosphère.

****La biosphère est un milieu de vie très variée (espèces nombreuses et diversifiées = Biodiversité).**

Structure interne de la Terre: Enveloppes internes de la Terre

Introduction

- Pour bien comprendre la formation des Minéraux et des Roches il faut connaître la structure interne de la Terre.

- La Terre est constituée d'une série de couches concentriques de propriétés chimiques et/ou physiques différentes. La structure interne de la Terre a été mise en évidence en grande partie grâce à l'étude de la propagation des ondes sismiques émises pendant les grands tremblements de terre. Les autres informations concernant la structure et la composition interne de la terre proviennent de :

- L'échantillonnage direct de la croûte terrestre;
- L'étude des morceaux de roches du manteau supérieur remontés par certains volcans;

- L'étude des météorites;
- Et les travaux expérimentaux de laboratoire (étude du comportement des minéraux du manteau à haute pression haute température grâce à l'utilisation de la cellule à enclumes de diamant).

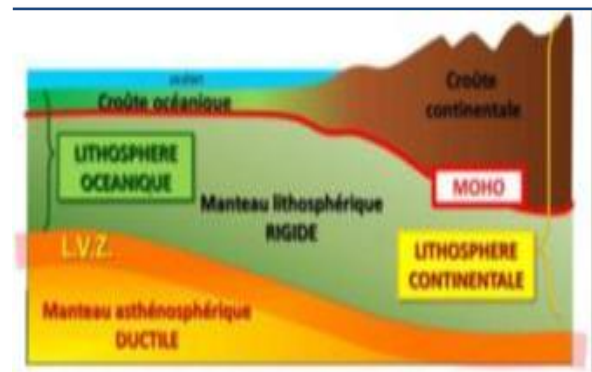
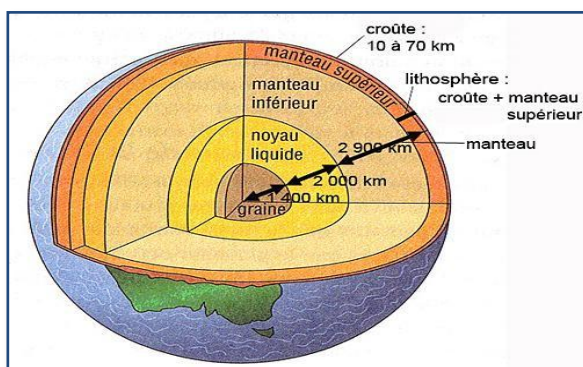
Les couches de compositions chimiques différentes : Fig.12

La **structure interne de la Terre** est répartie en plusieurs enveloppes successives. Selon la composition chimique, on distingue trois parties principales : la croûte, d'épaisseur allant de 10 à 70 kilomètres, puis le manteau, qui s'étend de la base de la croûte jusqu'à une profondeur de 2900 kilomètres et enfin le noyau.

a- La croûte (ou écorce): Qui compose la surface de la Terre est de loin, la couche la moins épaisse, mais la plus superficielle, compte pour moins de 2% en volume et qui est solide. La composition chimique de la croûte est connue par l'observation directe des roches (le plus grand forage jamais réalisé, celui de la presqu'île de Kola en Russie, atteint 12 kilomètres de profondeur) et par l'étude des ondes émises par les séismes proches ou par les séismes provoqués. **La croûte est divisée en deux parties: La croûte continentale et la croûte océanique.**

⊗ **La croûte continentale :** Qui est plus épaisse à cause de sa plus faible densité (densité 2,7 à 3), s'étend de 30 à 70 km, possède près de la surface la composition moyenne des granites et qu'on nomme **SIAL** (silicium-aluminium). La croûte continentale a une composition de roche magmatique intermédiaire (**Nicollet, 2014**).

⊗ **La croûte océanique,** celle qui en gros se situe sous les océans, qui est épaisse de 8 à 10 km de densité 3,2 et constitue le plancher des océans. Sa composition est basaltique et qu'on nomme aussi SIMA (silicium-magnésium).



Enveloppes de la Terre, la lithosphère (La lithosphère englobe la croûte terrestre et une partie du manteau).

Origine de la croûte terrestre : Qu'elle soit continentale ou océanique, la croûte est toujours issue de la **fusion partielle des péridotites du manteau** qui donne naissance à un **magma**. Ce magma cristallise plus ou moins rapidement pour **former ou régénérer une croûte**.

Nature minéralogique de la croûte : L'enveloppe solide la plus superficielle (croûte = écorce) est composée de granite (croûte continentale) ou de basalte (croûte océanique).

Tab.1. Comparaison entre la croûte continentale et la croûte océanique.

Agents Croûte	Genèse	Composition	Épaisseur, Km	Âge, Ma
Continentale	Fusion partielle des péridotites du manteau.	Type granitique. (γ)	30 - 70	Jusqu'à 4000
Océanique	Fusion partielle des péridotites du manteau.	Type basaltique. (β)	5 - 15	Toujours < 200

Tab.2. Principaux éléments chimiques qui composent la croûte terrestre.

Oxygène (O)	46,6 %	~ 75 %
Silicium (Si)	27,7	
Aluminium (Al)	8,1	
Fer (Fe)	5,0	
Calcium (Ca)	3,6	
Sodium (Na)	2,8	
Potassium (K)	2,6	
Magnésium (Mg)	2,1	
... les autres	1,5	

(Source: Pierre, 2004)

La base de la croûte est caractérisée par un brusque changement de densité (2,9 à 3,3 g/cm³). Un géologue croate, Andrija Mohorovicic a découvert en 1909 l'existence d'une discontinuité dans la propagation des ondes sismiques. On appelle **discontinuité de Mohorovicic** ou **Moho**, la discontinuité sismique qui marque la limite entre la croûte et le manteau. Le Moho est situé à environ 35 km (jusqu'à 70 km sous les grandes chaînes de montagnes) sous les continents, et à environ 10 km sous les océans.

b- Le manteau: Sous le Moho s'étend le manteau qui occupe 83 % du volume de la Terre et représente 67% de sa masse. Il s'étend en profondeur jusqu'à environ 2900 km. La composition moyenne du manteau est celle d'une roche nommée **péridotite (roche ultrabasique riche en silicates de magnésium et de fer)** composée d'olivine, de pyroxène et de grenat. La composition chimique moyenne du manteau ne change pratiquement pas, mais la minéralogie du manteau varie en fonction de la profondeur (voir le paragraphe sur les couches de propriétés physiques différentes).

Une ultime discontinuité située à 2900 km de profondeur, sépare le manteau inférieur du noyau. Elle se traduit par une augmentation de densité de 5,5 g/cm³ à 10 g/cm³: c'est la

discontinuité de **Gutenberg**, découverte en 1913.

Nature minéralogique du manteau : Le sommet du manteau (jusqu'à 400 km de profondeur) serait de nature **péridotitique** de type **olivine**. Entre 400 et 2900 km, la pression augmentant, les minéraux vont prendre une structure cristalline de plus en plus dense sous forme d'abord de **spinelle** (jusqu'à 650-700 km, limite manteau inférieur/supérieur) puis de **pérovskite** à la base du manteau.

Péridotite: Roche magmatique ultrabasique grenue constituée d'olivine dominante accompagnée de pyroxène et de spinelle (picotite, chromite).

Olivine: Est un minéral du groupe des silicates, sous-groupe des néosilicates, de formule $(Mg,Fe)_2[SiO_4]$. Elle cristallise dans le système cristallin orthorhombique.

Spinelle: Est une espèce minérale de la famille des oxydes (oxyde de magnésium et d'aluminium) de formule $MgAl_2O_4$ (oxyde de magnésium et d'aluminium).

Pérovskite: Désigne à l'origine le minéral $CaTiO_3$ (titanate de calcium).

c- Le noyau : Constitue la partie centrale de la Terre et qui forme 17% du volume terrestre et qui se divise en deux couches, **noyau interne** ou **graine**, une boule de **fer solide** située à 6380 km de la surface de la terre **solide** et **noyau externe** (la brusque interruption de propagation des ondes S à la limite entre le manteau et le noyau indique que le noyau externe est **liquide - mélange fluide de fer et de nickel**), séparé par une discontinuité (**discontinuité de Lehmann**) à 5150 km de profondeur. A la limite entre ces deux couches, la densité passe de 12,3 g/cm³ à environ 13,3 g/cm³, et atteint 13,6 g/cm³ au centre de la Terre, soit à 6380 km.

Nature minéralogique du noyau : Le noyau est constitué essentiellement de **fer** (Fe) et de **nickel** (Ni). Le passage au noyau interne s'accompagne de la cristallisation du fer et du nickel expulsant les éléments légers vers le noyau externe.

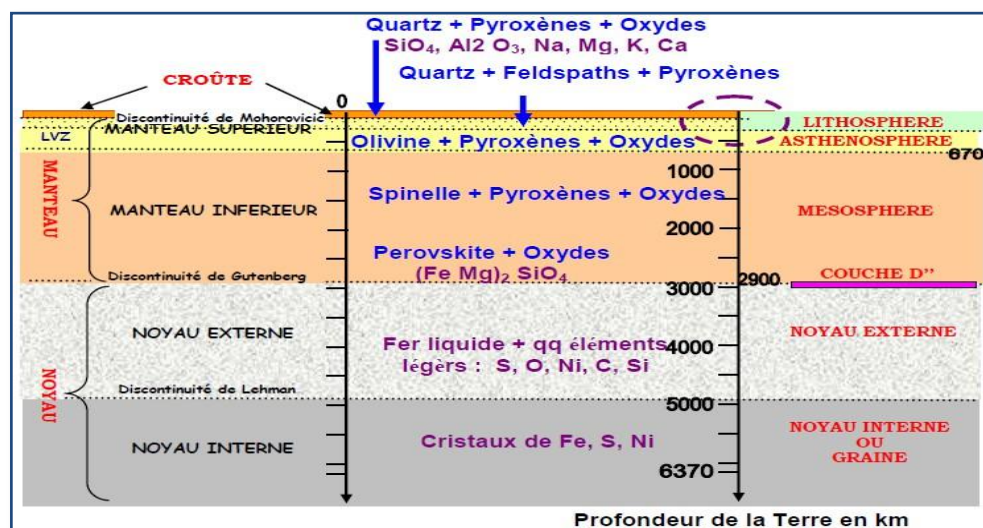


Fig.11. Répartition des éléments chimiques et des minéraux à l'intérieur de la Terre

I.4.3.3. Les couches de propriétés physiques différentes: Fig. 12, 13

Des discontinuités sismiques ont été mises en évidence dans le manteau de la Terre et sont dues principalement aux changements des propriétés physiques. Il est important de rappeler qu'il n'existe pas de changements majeurs de composition chimique dans le manteau. On distingue ainsi : **la lithosphère**, **l'asthénosphère** et la **mésosphère**. Cette division de la structure interne du globe est à la base de la théorie de la tectonique des plaques.

a- La lithosphère: (du grec *lithos* : **Pierre**, et sphère), est l'enveloppe terrestre rigide de la surface. Elle comprend la croûte terrestre (océanique et continentale) et la **partie supérieure du manteau supérieur**. La lithosphère est caractérisée par sa rigidité et son élasticité. La vitesse des ondes sismiques est élevée. Son épaisseur est de 100 km en moyenne (70 km sous les océans et 130 km sous les continents). Elle est divisée en un certain nombre de plaques tectoniques, également appelées **plaques lithosphériques**. La lithosphère, rigide, repose sur **l'asthénosphère**, solide mais ductile, plus facilement déformable car constituée de roches de relativement faible viscosité.

b- L'asthénosphère: (Barrell, 1914, du grec *asthenos*: **sans résistance** et sphère): Est la partie ductile (plus visqueuse) du manteau supérieur terrestre. Elle repose sous la lithosphère rigide et sur la mésosphère (manteau inférieur). Les roches de l'asthénosphère sont relativement malléables (rigidité faible) et peuvent être facilement déformées.

L'asthénosphère, moins rigide, qui permet par glissement le déplacement des plaques de la croûte.

L'asthénosphère est divisée en deux parties:

- **L'asthénosphère supérieure**, qui s'étend entre 120 km et 250 km, appelée **LVZ** (low velocity zone : Zone à Faible Vitesse de propagation des ondes sismiques. La vitesse de propagation des ondes sismiques diminue dans cette région). C'est la couche où la péridotite subit une fusion très faible, ce qui lui permet de se déformer facilement. Dans cette zone à faible vitesse de propagation entre 100 à 250 km, il n'existe pas de diminution en densité ou en composition. Cette zone est de même composition que le reste du manteau.

- **L'asthénosphère inférieure**, qui s'étend de 250 km à 670 km de profondeur. Les roches redeviennent relativement rigides (malgré la température élevée, à cause des fortes pressions qui compriment les roches). Une discontinuité sismique a été mise en évidence dans cette couche à 400 km de profondeur.

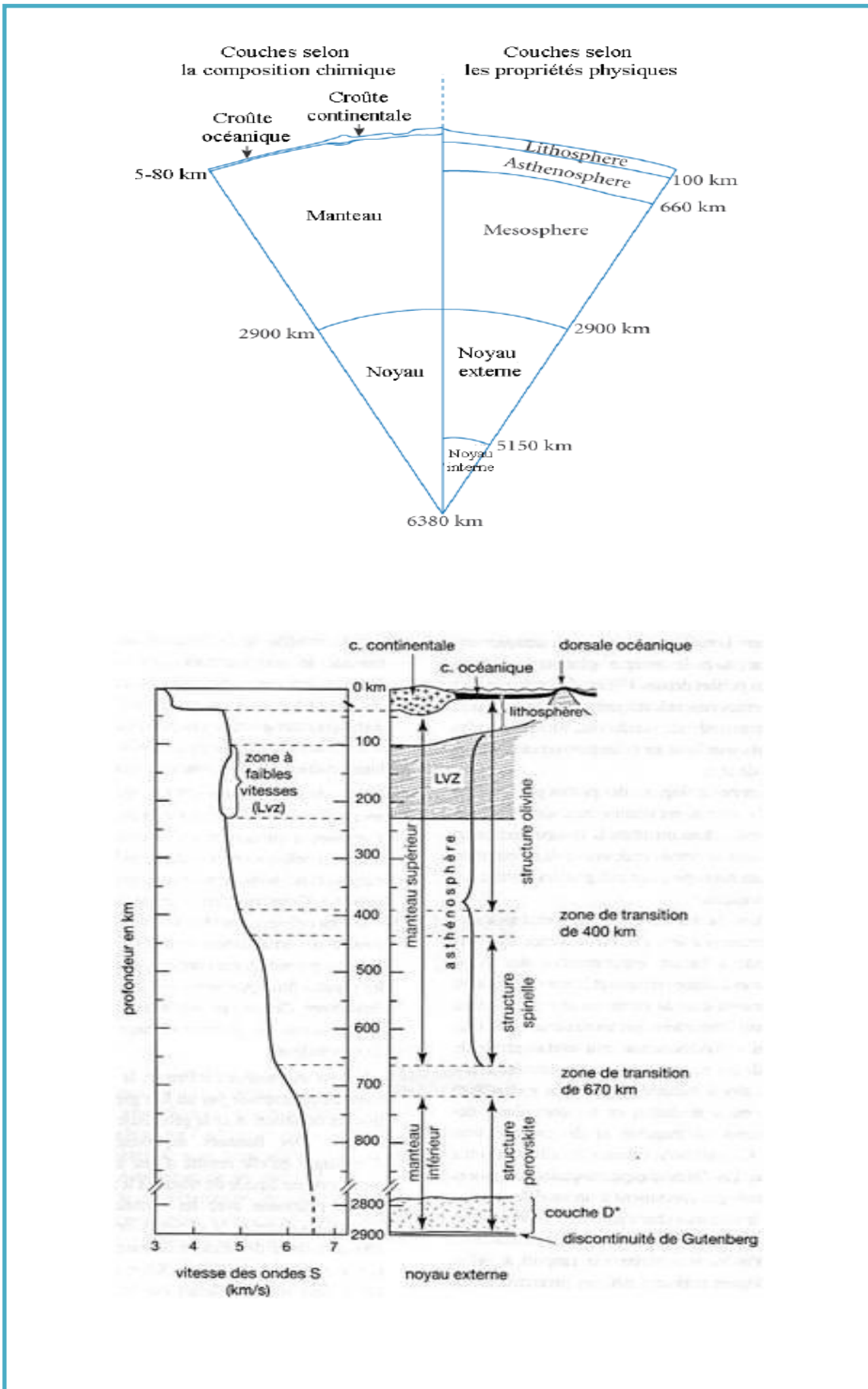
Elle est due à un changement de la structure de l'olivine (qui est l'un des principaux minéraux de la péridotite).

L'asthénosphère et la lithosphère sont séparées par **la discontinuité LVZ** (Low Velocity Zone, zone des faibles vitesses).

c- Le manteau inférieur ou mésosphère : (du grec *meso*:moyen ou *milieu*): qui s'étend de 670 km à 2900 km de profondeur. Cette couche est caractérisée par une nouvelle discontinuité sismique à une profondeur de 670 km. La densité du manteau augmente de 10%. Cette discontinuité serait due aux conditions de température et de pression à cette profondeur qui conduisent à une nouvelle transformation minéralogique, les minéraux de l'asthénosphère inférieure seraient remplacés par un assemblage de minéraux de type **perovskite silicatée** et **d'oxyde de magnésium**. La discontinuité de 670 km correspond aussi à la profondeur maximale des foyers des tremblements de terre.

*Notons que les 300 derniers kilomètres du manteau inférieur forment une zone fortement hétérogène sur le plan thermique et chimique. On pense que la base du manteau est le siège d'importantes réactions chimiques entre les silicates du manteau et le fer liquide du noyau. Cette couche a reçu le nom de **couche D**'.*

d- le noyau : Est divisé en deux couches selon les propriétés physiques : un noyau externe liquide et un noyau interne ou graine (solide) séparé par une discontinuité (discontinuité de Lehmann) à 5150 km de profondeur.



Chapitre II: Géodynamique externe



Chapitre II: Géodynamique externe

Introduction

La **géodynamique** (la **dynamique de la Terre**) est l'étude des événements naturels auxquels est soumise notre planète. Ces manifestations se traduisent de différentes manières, ce qui nous amène à distinguer :

- **La géodynamique interne**: ce sont les forces tectoniques induites par les mouvements convectifs lents du manteau, et les déplacements consécutifs de l'écorce terrestre. Les contraintes imposées à la lithosphère peuvent engendrer des phénomènes soudains, tels que les éruptions volcaniques et les séismes. Mais, à l'échelle des temps géologiques, la géodynamique interne est responsable de la surrection des montagnes, ou inversement du creusement de larges fossés (grabens) comme le grand rift africain (**Bourque, 2004**).

- **La géodynamique externe** étudie la structure et l'évolution des enveloppes externes de la Terre. Son domaine englobe tous les phénomènes dissipant une énergie qui provient, plus ou moins directement, du rayonnement solaire. L'enveloppe superficielle solide de la Terre, la lithosphère, est entourée de plusieurs enveloppes fluides. L'hydrosphère est l'enveloppe liquide recouvrant près de 60% de la surface du globe et l'atmosphère est l'enveloppe gazeuse entourant la planète. Grâce à ces deux enveloppes, la vie a pu se développer sur la Terre et former une quatrième enveloppe superficielle, une enveloppe vivante : la biosphère. Atmosphère et hydrosphère sont des enveloppes dynamiques à l'équilibre fragile. Il est intéressant de comprendre leurs mécanismes de déplacements et de transferts physico-chimiques afin de prévoir les éventuelles conséquences sur l'évolution de l'environnement planétaire.

La géodynamique externe (dynamique externe de la Terre): Ce sont les manifestations physiques d'ordre **météorologiques**, ou qui y sont liées : Altération, Érosion...

Érosion (Dénudation)

Définitions

- En géologie, l'**érosion** est l'ensemble des phénomènes exogènes tendant à modifier le relief de l'écorce terrestre en l'attaquant et en le nivelant.

- **Érosion** : Est l'ensemble des phénomènes mécaniques et chimiques de désagrégation des roches et des sols par les agents atmosphériques et par l'eau.

- L'érosion (du latin *erodere*, ronger) regroupe l'ensemble des phénomènes externes

qui, à la surface du sol ou à faible profondeur, enlève tout ou partie des terrains existants et modifient le relief (**Foucault et al., 2005**).

Causes/facteurs de l'érosion

- Le **Climat** constitue la cause et la source d'énergie érosive. Ce sont les gouttes de pluie, les eaux de ruissellement sur les terrains en pente et les vents violents qui détachent et entraînent les particules terreuses;
- La **topographie du terrain** conditionne la gravité de l'érosion. - La **pente**;
- La **nature des sols** et leur vulnérabilité à l'érosion / Les **propriétés physico-chimiques des roches** (dureté et solubilité de la roche par ex.). Les sols issus de roches tendres (marnes, flyshes et schistes feuilletés) sont imperméables et très sensibles à l'érosion ;
- L'**histoire tectonique** (fracturation par ex.);
- L'**action de l'homme** (pratiques agricoles, urbanisation...).
- L'**absence du couvert végétal** qui expose le sol à l'action directe des gouttes de pluie. - **Biostasie**.

Biostasie :- Période stable dans la constitution du relief, où l'absence d'érosion résulte de la présence d'une couverture végétale durable.

- L'absence d'érosion du relief due à une couverture végétale continue.

Rôle du couvert végétal: Les plantes cultivées ou naturelles protègent le sol contre l'érosion hydraulique et éolienne.

Mécanisme d'érosion

Dans les processus d'érosion, on distingue généralement trois phases distinctes :

- a- Destruction du matériel rocheux;
- b- Transport;
- c- Accumulation des débris.

Le **degré d'érosion** dépend des caractères de la roche :

- a- La dureté (les roches et les minéraux les plus résistants sont : le diamant et le corindon, les moins sont : le talc, la calcite...) => L'érosion sera donc plus lente. ;
- b- La capacité de dilatation de la roche;
- c- Sa chimie.

Types d'érosion

Érosion mécanique ou physique

La désagrégation mécanique se produit sous l'action d'une force physique qui arrache des morceaux de roche plus ou moins volumineux :

* **Éclatement** dû au gel ou à la chaleur;

* **Usure par frottement** par ex. glacier, écoulement d'eau ou vent.

L'érosion mécanique est particulièrement active dans les milieux froids (**gel / dégels**) et ou arides: **La gélifraction (cryoclastie)**: C'est la destruction des matériaux rocheux sous l'effet des alternances gel-dégel, en raison des contraintes exercées par les changements d'état de l'eau (surtout au printemps et en automne).

Érosion chimique

Décomposition chimique des roches, le principal processus est **la dissolution**. En particulier des calcaires par la pluie plus ou moins acide – Karst.

Ex. Les mécanismes de dissolution (karst) $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$

L'action de l'eau: Elle est mécanique et chimique, avec comme principale altération.

- **L'hydroclastie**: Est un processus de météorisation mécanique conduisant à la fragmentation des roches ou minéraux par des variations cycliques de teneur en eau lors de phases de dessiccation/humectation.

(<https://fr.wikipedia.org/wiki/Hydroclastie>).

- **L'effetsplash**: Impact des gouttes d'eau qui tombent sur le sol (Jacques, 2006).
- **Splash**: Érosion résultant de l'impact des gouttes de pluie.

L'érosion par l'eau est renforcée par la pente – **Les torrents. Le**

Torrent : C'est un cours d'eau, temporaire, à pente, rapide existant dans les régions montagneuses.

Le torrent est un laboratoire naturel

L'étude de l'érosion fluviale car il creuse

Transporte et dépose beaucoup.

Un torrent se divise en 3 parties :

- Le bassin de réception;
- Le chenal d'écoulement;
- Le cône de déjection.

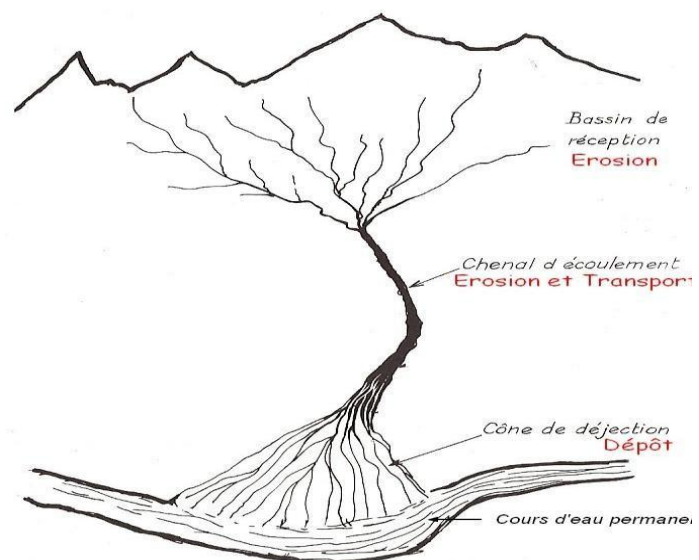


Fig.14: Parties d'un Torrent

L'action du vent: (Éole, Dieu des vents et éolienne = Moteur actionné par le vent):

Est le phénomène de dégradation du sol sous l'action du vent qui arrache, transporte et dépose des quantités importantes de terre. Elle s'installe quand :

- Il existe des vents violents et réguliers durant de longues périodes dans la même direction (vents dominants) ;
- Ils agitent un sol à texture grossière, sableux notamment ;
- Il existe des reliefs atténués sur de grandes étendues plates ;
- Le climat a une saison sèche entraînant la dessiccation des horizons superficiels du sol et la disparition du couvert végétal.

Effet et importance de l'érosion éolienne:

Comme l'érosion hydrique, l'érosion éolienne est néfaste pour le développement économique et l'avenir de l'environnement de l'homme dans les zones propices à son installation. Les dangers sont notamment :

- La baisse de productivité des sols:
 - o Entraînement des éléments fertilisants;
 - o Dégradation de la structure;
 - o Dessèchement du sol;
 - o Dégâts au niveau des plantes.
- L'ensablement des infrastructures:
 - o Réseaux d'irrigation;
 - o Parcelles de culture, pâturages;
 - o Voies de communication, villages.

Érosion liée aux différences de température

La thermoclastie (changements de température) : C'est la destruction des matériaux rocheux sous l'effet de fortes variations de température. (Ex. milieux arides et semi-arides).

Érosion causée par les êtres vivants

- Biométéorisation;
- Microorganismes;
- Végétaux peuvent concourir à l'érosion par leurs racines ;
- L'homme: Déforestation et urbanisation diverses.

Altération (Météorisation)

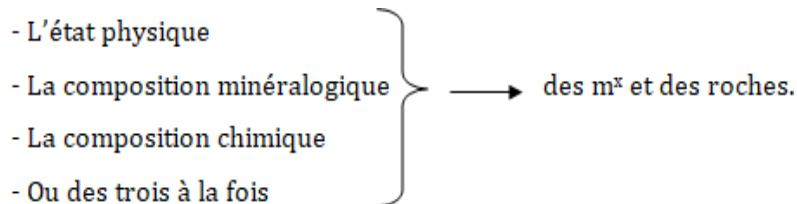
Définitions

- La désagrégation superficielle de la roche ou du sol par des agents atmosphériques, appelée **météorisation**.

- Ensemble des modifications chimiques et physiques qui affectent les sédiments et les roches exposés à l'atmosphère, à l'hydrosphère et à la biosphère. Elle est contrôlée par:

- o La solubilité des minéraux;
- o La structure de la roche ;
- o Le climat (température et précipitations) ;
- o La présence de soleil et de végétation;
- o La durée d'exposition (**Michelet al., 2003**).

- L'ensemble des processus de désagrégation physique et de décomposition chimique des m^x et des roches sous l'action des facteurs atmosphériques. C'est-à-dire l'altération est l'ensemble des modifications de :



Types d'altération

Altérations mécanique ou physique: Désagrégation sous l'effet des actions mécaniques (physiques): Ce sont essentiellement des dislocations dues aux variations de Eau/ Vent/ Gel/ Température / Dessiccation / Action des racines... entraînant le déchaussement de la roche en agrégat ou en minéraux eux-mêmes.

L'altération mécanique modifie le rapport surface/volume.

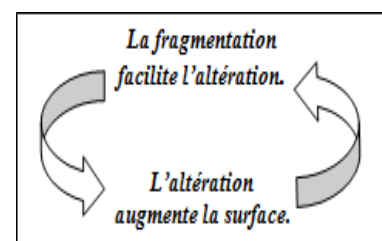
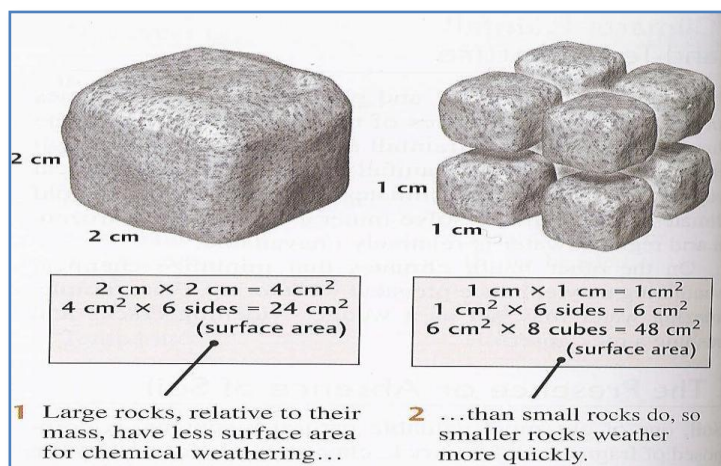
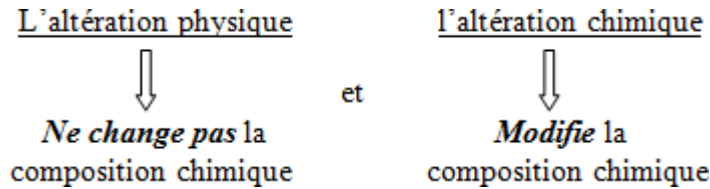


Fig.15:

Altérations chimiques:

Souvent associée à l'altération physique. Elle constitue le processus essentiel de la formation des sols. La plus importante est l'hydrolyse, c'est-à-dire l'attaque des minéraux par des eaux pures ou chargées en CO₂. L'eau = agent majeur de l'altération.



Principales réactions d'altération

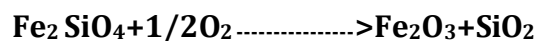
L'altération chimique des roches se fait en présence d'eau; elle a lieu essentiellement en climat humide. Les réactions sont des hydrolyses, accessoirement des oxydations, des hydratations, des décarbonatations pour les roches calcaires.

Les éléments solubles sont lessivés. Les parties insolubles restent sur place, se recombinaient et forment des minéraux de néoformation, principalement des argiles.

Les organismes peuvent intervenir à tous les stades de ce processus. Ils fournissent en particulier des matériaux minéraux ou organiques.

a) Dissolution: Ce processus physique simple concerne les roches salines: sel gemme, potasse et gypse.

b) Oxydation et réduction: Les oxydations intéressent surtout le fer qui passe de l'état ferreux à l'état ferrique. Olivine + Oxygène -----> Oxyde ferrique + Silice



Les réductions sont plus rares; elles interviennent dans les milieux hydromorphes et produisent en particulier le passage du fer ferrique au fer ferreux soluble.

c) Hydratation: C'est une incorporation de molécules d'eau à certains minéraux peu hydratés contenus dans la roche comme les oxydes de fer; elle produit un gonflement du minéral et donc favorise la destruction de la roche.

d) Décarbonatation: Elle produit la solubilisation des calcaires et des dolomies généralement sous l'action du CO₂ dissous dans l'eau: $\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} > \text{Ca}(\text{CO}_3)_2$

e) Hydrolyse: Les hydrolyses, c'est à dire la destruction des minéraux par l'eau, sont les principales réactions d'altération. Cas d'un feldspath sodique, l'albite:



- L'altération chimique favorise le développement de sols au détriment de la roche mère en libérant des éléments chimiques qui seront évacués par le drainage. Elle transforme la composition initiale de la roche mère par mise en solution ou précipitations d'éléments.
- L'altération mécanique tend à diminuer l'épaisseur des sols et des roches en arrachant mécaniquement des particules qui seront transportées. Elle ne modifie pas la composition mais facilite le morcellement du matériau initial.
- En conclusion:
 - ✓ L'altération des roches est un processus géologique majeur;
 - ✓ L'altération forme les sols;
 - ✓ L'altération est un mécanisme de tri géochimique;
 - ✓ L'altération est un des mécanismes régulateurs de la composition de l'atmosphère et de la terre.

Dépôts (Sédiments)

Définitions

- Un *dépôt* correspond à une accumulation non consolidée de particules d'origine minérale, organique ou chimique.

- Les *dépôts* sont l'ensemble d'éléments déposés par l'eau, le vent, la glace qui proviennent de l'usure des continents, c'est à dire de la destruction de roches ou d'être vivants. La destruction se fait par des mécanismes physiques produisant la fragmentation des matériaux et des réactions chimiques donnant des solutions de lessivage (altération chimique) (Jacque, 2006).

Les éléments solides sont déplacés sous l'effet de la gravité, souvent par l'intermédiaire d'un fluide transporteur (eau, glace), et sous l'effet des variations de pression atmosphérique qui produisent les vents. Les éléments en solution sont transportés par l'eau.

Origine des sédiments

Les roches des continents subissent au contact de l'atmosphère et de l'hydrosphère, une **altération**. Cette altération par **désagrégation chimique et/ou mécanique** conduit à la formation d'éléments dissociés par les agents d'érosion.

- **L'altération (désagrégation) mécanique** dégrade la roche en petits fragments (débris).

- **L'altération (désagrégation) chimique** dégrade les roches et minéraux instables en sous-produits stables par l'intermédiaire de réactions chimiques.

Les **transports** s'effectuent par l'atmosphère ou par l'hydrosphère.

La **sédimentation** se fait la plupart du temps dans un milieu aqueux, le **dépôt** des particules procède:

1. De la sédimentation de matériaux détritiques;
2. De la précipitation chimique à partir des solutions ;

3. De l'accumulation biologique d'organismes.

Milieux de dépôt (Sédiment)

Les éléments destinés à former un sédiment sont d'abord généralement transportés à l'état solide ou en solution. Ils se déposent ou précipitent ensuite dans un milieu de sédimentation. Un milieu de sédimentation est une unité géomorphologique de taille et de forme déterminée où règne un ensemble de facteurs physiques, chimiques et biologiques suffisamment constants pour former un dépôt caractéristique.

Un milieu de sédimentation est un bassin (dépression) où règne un ensemble de facteurs physiques, chimiques et biologiques suffisamment constants pour former un dépôt caractéristique ; exemples : milieu fluvial, milieu lacustre, milieu deltaïque, milieu marin.

Principaux milieux de dépôt (Sédimentation)

Les milieux continentaux:

a) Milieux aériens : Sols; Pentes: éboulis, coulées de solifluxion ; Vallées torrentielles: alluvions ; Piedmonts ; Milieux glaciaires et les dépôts éoliens.

b) Milieux aquatiques: Plaines alluviales (grandes rivières permanentes); Lac et les marécages.

Les milieux marins:

a) Milieux littoraux (plage et plate-forme littorale):

* Sédimentation à dominance silico-clastique quand l'apport détritique est fort.

* Sédimentation à dominance carbonatée là où l'apport détritique est faible et le climat favorable au développement des organismes constructeurs.

b) Milieu de talus sous-marin: Sédiments détritiques rythmés mis en place en bas du talus par les courants de turbidité

c) Bassin et fosse océanique

Détritiques fins venant du talus auxquels s'ajoutent les particules fines tombant de la surface: débris planctoniques, poussières volcaniques... dépôt de boues pélagiques ou hémipélagiques. Le long des marges actives, un prisme sédimentaire souligne la position de la subduction.

Les milieux intermédiaires

Ils sont situés aux limites du domaine marin et du domaine continental et présentent des caractères mixtes :

* Estuaires: influence de la mer prépondérante

* Deltas: le fleuve a une action dominante; sédimentation abondante.

* Lagunes: très étenduessilabordureducontinentesttrèsplane.

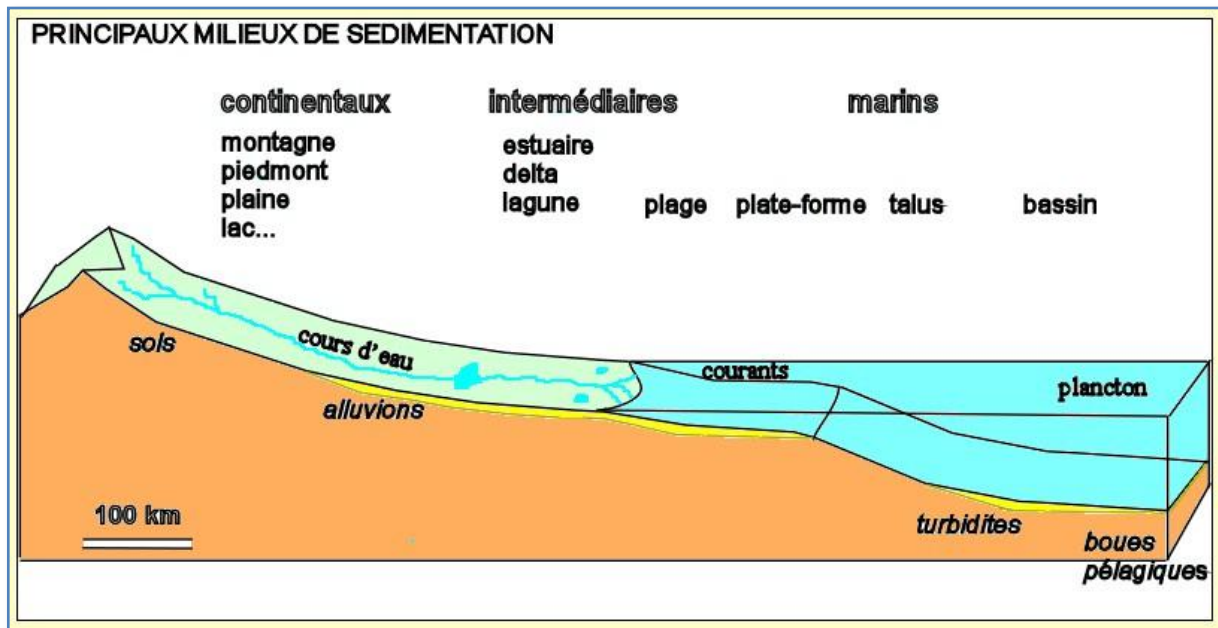


Fig.16: Principaux milieux de dépôt (Source: Jacques, 2006).

Différents types de sédimentation

Les rivières, océans, vents et eaux de pluies ont la capacité de transporter les particules issues de la désagrégation (destruction) des roches par érosion. Ces matériaux sont composés de fragments de roches et de minéraux. Lorsque l'énergie de transport n'est plus assez forte pour déplacer ces particules, ces dernières se déposent : c'est le **processus de sédimentation**. Ce type de sédimentation est appelé : **sédimentation détritique ou clastique**. Un autre type de dépôt sédimentaire se produit lorsque les matériaux sont dissous dans l'eau et précipitent. Ce type de sédimentation est dénommé : **sédimentation chimique**. Un troisième processus peut se produire lorsque les organismes vivants extraient les ions dissous dans l'eau pour former des coquilles et des os. Ce type de sédimentation est appelé : **sédimentation biogénique**.

Les roches sédimentaires

Notions sur les roches et les minéraux

a. Notions sur les roches

Définition: Une roche, est un matériau formé par un agrégat naturel de minéraux, de fossiles, et/ou d'éléments d'autre(s) roche(s).

(Source: http://aemq.org/FR/NOTIONS_GEOLOGIE).

Roche: Est un agrégat naturel de **minéraux**, de **minéraloïdes**,

de verre et/ou de matière organique qui composent l'écorce terrestre (**Tanguy, 2007**).

Le **granite** est une roche magmatique composée principalement des minéraux suivants : feldspaths, quartz et micas.

Le **calcaire** est une roche sédimentaire composée de fossiles et d'une matrice carbonatée. Le

charbon est une roche sédimentaire composée de matériel végétal lithifié.

L'**obsidienne** est une roche magmatique composée surtout de verre volcanique (**Chabou, 2017**).

Classification des roches:

* En fonction de la composition minérale:

- **Roches mono-minérales, ou roches monominérales** : composées d'un minéral majoritaire, ex : *Calcaire pur*.

- **Roches pluri-minérales, ou roches pluriminérales** : agrégat de plusieurs minéraux, ex : *Granite*.

* En fonction de l'homogénéité:

- **Roches dures et cohérentes** : "pierre";

- **Roches plastiques** : "argiles";

- **Roches meubles** : "arènes", "sables";

- **Roches fluides** = liquide : "huiles", "pétroles";

- **Roches fluides** = gazeuse : "gaz".

* En fonction de leurs modes et milieux de formations:

- ❖ **Roches exogènes** (formées en surface de l'écorce terrestre):

- **Roches sédimentaires/ roches Déposées** (qui proviennent de l'accumulation et la consolidation de sédiments ex. les roches d'origine détritiques, roches d'origine chimiques, ...) .Ce sont des roches qui résultent de la compaction et de la cimentation de boues, de sables, de graviers ou de fossiles. *Selon le mode de formation des roches sédimentaires on distingue :*

- **Roches sédimentaires détritiques:** Roches qui proviennent de l'érosion de roches préexistantes continentales (roches plutoniques, roches volcaniques, roches métamorphiques). Ex. Argilite, grès, conglomérat.

- **Roches sédimentaires chimiques et biochimiques :** Roches qui résultent de la précipitation d'une solution chimique ou de l'accumulation de débris de squelette d'organisme (fossiles) et de la transformation de matière végétale. Ex. Calcaire, dolomie, gypse, charbon.

❖ **Roches endogènes** (formées, au moins en partie en profondeur, à des pressions et températures supérieures à celles de la surface de l'écorce terrestre):

• **Roches magmatiques** / roches **Ignées** / roches **de Feu** / roches **Eruptives** (formées par la cristallisation / solidification du magma):

○ **Roches plutoniques [intrusives]**: Elles sont cristallisées au sein de la lithosphère. Se forment à partir d'un magma qui refroidit lentement à de grandes profondeurs (30 à 35 km) sous la croûte terrestre. En conséquence, les cristaux ont le temps de bien se former et la roche présente une texture grenue. Ex. Granite, gabbro ;

○ **Roches volcaniques [extrusives / effusives]**: Elles se sont épanchées en surface. Sont issues d'un magma qui refroidit rapidement à la surface de la croûte terrestre. En conséquence, les cristaux n'ont pas le temps de bien se former et la roche est à grain très fin. Ex. Basalte, rhyolite, andésite ;

○ **Roches hydrothermales**: Formées à partir de gaz ou de solutions à haute température, en relation avec des magmas ;

• **Roches métamorphiques** / roches **Transformées** (recristallisation de roches existantes, par suite d'augmentations de pression et température le plus souvent liées à l'enfouissement), **métamorphisme** (<http://www.luneceste.com/pages/repertoires-des-termes-en-mineralogie/lettre-r/roche.html>).

Les roches métamorphiques peuvent se former également au contact de roches plutoniques et de roches sédimentaires. Ex. Gneiss, paragneiss (**Togola, 2013**).

Ces trois grandes familles de roches sont liées entre elles à la surface de la Terre par le **cycle des roches**. Les roches magmatiques formées par la cristallisation du magma subsistent à la surface de la Terre les processus d'érosion qui conduisent à la formation et le dépôt de sédiments.

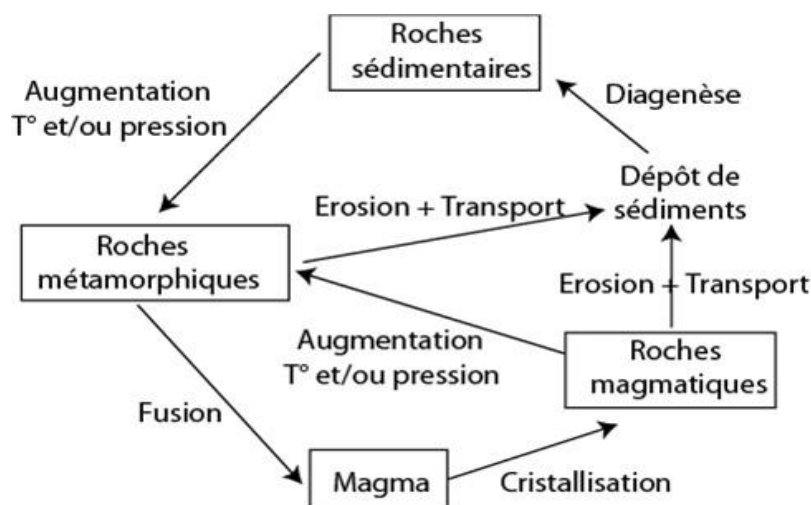


Fig.17: Cycle de formation des roches (Source: Nicollet, 2014).

Lapétrographie: (du grec *petra*, pierre, et *graphein*, écrire) est une des Sciences de la Terre qui s'intéresse à la description, à la classification, à l'étude de la formation et à la transformation des roches.

La pétrologie (du grec *petra*, pierre, *logos*, science) est donc la science qui s'intéresse à la description, classification et interprétation de la *genèse* des roches.

Lapétrogenèse cherche à comprendre les mécanismes de formation des roches.

Pétrographie + pétrogenèse = Pétrologie.

Le **magma** est à l'origine de la formation de la croûte terrestre, d'abord au niveau des dorsales océaniques, puis, par addition à la croûte déjà présente, aux niveaux des points chauds et des zones de subduction/obduction.

b. Notions sur les minéraux

Définitions

- **Un minéral** est un solide (*ce n'est pas un liquide, ni un gaz*), naturel (*il se forme sans l'intervention de l'homme*), possédant une composition chimique définie (*exprimée par sa formule chimique*) et une structure atomique ordonnée (*crystal*). Corps solide à la température ordinaire, constituant les roches de l'écorce terrestre. **ex** : Pyrite = FeS₂, Quartz = SiO₂. (Substance chimique, homogène souvent à l'état cristallin)

- **Minéral** : Un minéral est une substance inorganique solide qui se présente sous forme de cristal ou solide cristallin. **(Simon, 2013)**.

- **Un minéral** est une substance formée naturellement ou synthétisée artificiellement, définie par sa composition chimique et l'agencement de ses atomes selon une périodicité et une symétrie précises qui se reflètent dans le groupe d'espace et dans le système cristallin du minéral.

- On appelle un **crystal** un solide minéral naturel homogène aux formes régulières, limité par des surfaces habituellement planes faisant entre elles des angles bien définis.

- Un **minéraloïde** est un minéral auquel il manque une *structure atomique ordonnée*. Un minéraloïde possède toutes les caractéristiques d'un minéral *sauf la structure atomique ordonnée*. **(Chabou, 2017)**.

Le polymorphisme et l'isomorphisme:

Deux espèces minérales sont **polymorphes** si elles ont la même composition chimique et des structures cristallines différentes.

Deux espèces minérales sont **isomorphes** si elles ont la même structure cristalline et des compositions chimiques différentes.

Minéralogie:

- La minéralogie est la science qui étudie les minéraux.

- La **minéralogie**, une des plus anciennes parmi les Sciences de la Terre, a pour but l'étude des minéraux, éléments ou composés naturels formant la croûte terrestre. Le but de la minéralogie est :

- De recenser et d'identifier les minéraux;
- De décrire les propriétés cristallographiques, physiques et chimiques des minéraux;
- De classer les minéraux;
- De promouvoir leur utilisation, permettre la synthèse de celles trop rares naturellement

pour la demande industrielle. La minéralogie comprend plusieurs parties :

1. La cristallographie - étude de la forme interne et externe des cristaux.
2. La cristallogénie - étude de la composition chimique, de la stabilité, et des conditions

d'apparition des minéraux.

3. L'optique cristalline - Étude des minéraux au microscope polarisant.

4. La minéralogie descriptive et déterminative - description et classification des minéraux.

Aperçu général

Il existe plus de 4000 variétés de minéraux dans la nature, mais seulement une douzaine de minéraux sont les plus abondants.

La majorité des minéraux qui constituent la croûte terrestre sont composés uniquement de huit (8) éléments chimiques : Oxygène (O) : 46,5 % Silicium (Si) : 28 % 82,5 % de la croûte terrestre Aluminium (Al) : 8% Fer (Fe) : 5% Calcium (Ca) : 3,5% Sodium (Na) : 3% Potassium (K) : 2,5 % Magnésium (Mg) : 2 %

ROCHES SÉDIMENTAIRES

Définition des roches sédimentaires

Les roches sédimentaires sont les roches qui résultent de l'accumulation et du compactage de débris d'origine minérale (dégradation d'autres roches), organique (restes de végétaux ou d'animaux, fossiles), ou de précipitations chimiques, mais pas uniquement. Ce sont des roches exogènes, c'est-à-dire qui se forment à la surface de la Terre. Les roches sédimentaires affleurent sur 75% de la surface des continents, mais en considérant l'ensemble de la croûte terrestre (depuis la surface jusqu'à 35 km de profondeur sous un relief plat), elles ne constituent plus que 5 % de son volume total (**Houti, 2012**).

Les roches sédimentaires ont une grande importance du point de vue économique : le pétrole, le gaz, le charbon, l'uranium, les matériaux de construction sont d'origine sédimentaire. Elles ont aussi une importance scientifique : c'est le seul type de roches contenant des fossiles.

Les roches sédimentaires se forment à partir de sédiments.

Étapes de formation d'une roche sédimentaire : La formation des roches sédimentaires passe par plusieurs étapes :

1. L'altération : La désagrégation superficielle de la roche ou du sol par des agents atmosphériques.

2. L'érosion : C'est le processus de destruction de roches préexistantes par les agents suivantes : les eaux, le vent, le gel, la température.

3. Le transport : les sédiments issus de l'érosion peuvent être transportés sur de grande distance par le vent, ou par les eaux dans les fleuves, rivières ou courants océaniques.

4. Le dépôt (Sédimentation) : lorsque la vitesse de l'agent de transport devient faible pour continuer à transporter les sédiments, ces derniers se déposent. Le dépôt se fait dans des bassins de sédimentation, le plus souvent au fond des mers.

5. La diagenèse : on appelle diagenèse le processus physico-chimique qui transforme un sédiment meuble en roche consolidée. La diagenèse passe par deux étapes :

- **La compaction** : les sédiments se rapprochent entre eux avec diminution des vides ou des pores entre les particules, et élimination de l'eau qui se trouve entre les pores.
- **La cimentation ou lithification** : les sédiments se lient entre eux par un ciment d'origine chimique. Les sédiments se transforment alors en une roche solide.

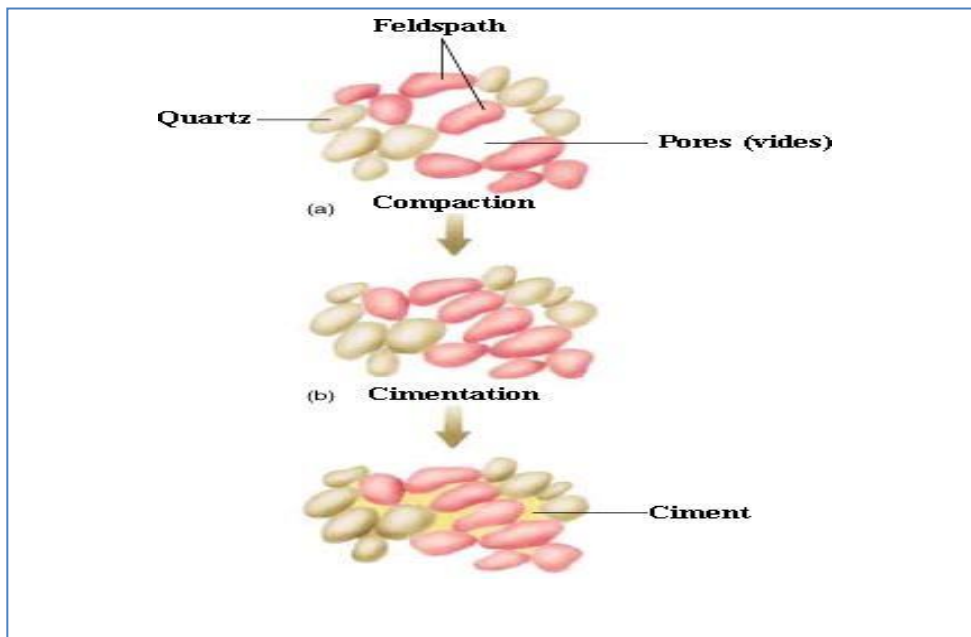


Fig.18: Différentes étapes de la diagenèse

Les principaux paramètres (facteurs) de diagenèse, sont:

1. L'halmyolyse (processus biologique);
2. La compaction (processus physique);
3. La cimentation (processus chimique);
4. La recristallisation (processus physique).

Les propriétés des roches sédimentaires

- ✓ Elles sont **disposées en couches superposées ou strates (roches stratifiées)**.
- ✓ Elles **emprisonnent** souvent, au moment de leur formation, des **êtres vivants** ou **morts** qui restent, dans les roches, à l'état de **fossiles (roches fossilifères)**.

Lecycles sédimentaire (Le cycle de formation d'une roche sédimentaire)

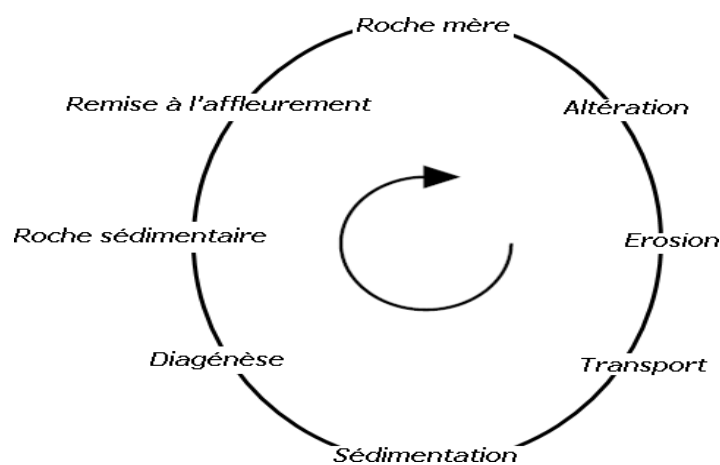


Fig.19: Cycle sédimentaire d'après Dercourt et Paquet, 1995 (Source: Gaudin, 1996)

Classification des roches sédimentaires (Principaux types)

Les roches sédimentaires sont de composition chimique et minéralogique variée; elles sont souvent faites de mélanges. Leur origine est souvent multiple. Il est ainsi difficile de proposer une classification satisfaisante.

a. D'après leur origine, on distingue:

1. Les roches détritiques (ou clastiques):

Les roches sédimentaires détritiques se forment à partir de roches préexistantes (Provenant de la destruction de roches, ou d'organismes: cailloutis, sables, sables coquilliers) et sont constituées de fragments de roches et de minéraux. Elles représentent 85 % des roches sédimentaires présentes à la surface de la Terre. La classification des roches détritiques se base sur la taille (granulométrie) des particules.

Tab.3: Classification des roches sédimentaires d'origine détritique

Nom de la particule	Taille de la particule	Nom du sédiment	Classe	Nom de la roche solide
Blocs	> 256 mm	Graviers	Rudites	Conglomérats
Gros cailloux	64-256 mm	Graviers		
Petits cailloux	2-64 mm	Graviers		
Sable	1/16-2 mm	Sables	Arénites	Grès
Silt	1/256-1/16 mm	Silts	Lutites	Siltites
Argile	< 1/256 mm	Argiles	(Pélites)	Argilites

(Source: Chabou, 2017).

2. Les roches chimiques

Les roches sédimentaires d'origine chimiques sont formées à partir de la précipitation ou la cristallisation de substances/corps (ions ou sels minéraux) dissoutes dans l'eau: sel gemme, potasse, tufs calcaires, silex.

3. Les roches biochimiques, biogéniques, ou organiques

Les plantes et les animaux peuvent extraire les substances dissoutes dans l'eau pour constituer leurs tests ou leurs os et ce sont leurs restes qui constituent les roches sédimentaires d'origine biochimique.

b. D'après la composition chimique, Les roches sédimentaires d'origine chimique et biochimique sont classées d'après la composition chimique, on distingue:

- Les roches siliceuses (silice) ;
- Les roches argileuses (phyllosilicates d'aluminium);
- Les roches carbonées (carbone hydrocarbures) ;
- Les roches ferrifères (oxydes, hydroxydes de fer);

- Les roches salines (chlorures, sulfates de Ca, Na, K) ;
- Les roches phosphatées (phosphates de calcium) ;
- Les roches carbonatées (carbonates de calcium et magnésium) (**Frédéric, 2012**).

Les roches sédimentaires sont des archives géologiques qui enregistrent les changements des conditions de vie et de la biodiversité. Par exemple, on peut estimer la période de vie d'un fossile en datant la roche sédimentaire dans laquelle on le trouve. Ainsi, les paléontologues ont montré la succession et le renouvellement des groupes et des espèces au cours du temps et donc reconstitué la vie ancienne.

Méthodes d'études (Méthodes géochronologiques)

Définitions:

➤ **Chronologie** (du grec *chrono*, temps, et *logos*, parole = science) est l'étude de la localisation des événements dans le temps, ex : une chronologie de l'évolution, une chronologie des temps géologiques...

➤ **Géochronologie** (ou **géologie historique**): Ensemble des méthodes de *datation* utilisées pour dater les *roches* et les différents événements de l'histoire de la *Terre* une chronologie de l'évolution, une chronologie des temps géologiques... comprenant :

- **Stratigraphie** et **la paléontologie**, qui permettent une géochronologie relative (**datation relative**) ;
- **Radiochronologie**, qui est une des méthodes de géochronologie absolue (**datation absolue**).

La **géochronologie** est une discipline basée sur la stratigraphie. Celle-ci est une science qui étudie la succession des dépôts sédimentaires généralement arrangés en couches ou "**strates**".

Chaque couche géologique est caractérisée par son contenu

lithostratigraphique, biostratigraphique et chronostratigraphie:

- **Lithostratigraphie**: La description du contenu lithologique des couches. La nature des roches sédimentaires nous informe sur le milieu de sédimentation et comment cet environnement a évolué dans le temps.

- **Biostratigraphie**: La description des fossiles que contient une strate dont l'unité est **labiozône** (faune et flore relatives à un temps). Elle nous renseigne sur l'évolution de ces fossiles dans le temps et dans l'espace dans leur environnement sédimentaire.

- **Chronostratigraphie** : Consiste à définir les intervalles de temps des strates et à retracer les différentes évolutions paléogéographiques.

➤ **Biochronologie**, basée sur l'étude du contenu paléontologique (les fossiles) des couches géologiques, permet de connaître l'âge relatif de certains terrains.

✚ **Méthodes géochronologiques**, On distingue:

- Les méthodes radiochronologiques (physiques) qui donnent un âge absolu ;
- Les méthodes stratigraphiques qui donnent un âge relatif ;
- Les méthodes paléontologiques qui donnent par les fossiles un âge biologique qui calé sur les âges absolus ;
- Les méthodes de datation par paléomagnétisme, surtout aux laves océaniques.

Chronologie relative

Les méthodes stratigraphiques (Principes d'ordre géométrique)

L'étude des roches et de leurs relations géométriques permet de reconstituer leur histoire dans le temps et de mettre en relation la succession de strates dans une région donnée.

✚ Notion de stratigraphie

- Partie de la géologie qui étudie les couches de l'écorce terrestre en vue d'établir l'ordre normal de superposition et l'âge relatif. (C'est l'étude dans l'espace et dans le temps des dépôts successifs).

- On appelle **stratigraphie**, l'étude de la succession des strates ou couches sédimentaires. Elle permet avec la sédimentologie de reconstituer l'évolution des dépôts sédimentaires dans l'espace et dans le temps mais aussi la reconstitution de paysages du passé (paléogéographie) (**Frédéric, 2012**).

❖ **Unterrain**: Est un ensemble de couches (strates).

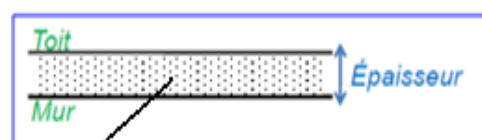
❖ **Stratigraphie**:

- Est un dépôt sédimentaire continu, homogène, séparé des dépôts inférieurs au mur et supérieur à son toit, par un changement marqué de composition qui est appelé surface de stratification.

- On appelle **strate** la plus petite division (unité) lithologique. Une strate est définie par :

a. Deux plans ou deux surfaces parallèles, le «**mur**» et le «**toit**»;

On appelle **toit** d'une couche le sommet de la couche ou sa limite supérieure, le **mur** étant sa partie basale ou sa limite inférieure.



Surface de stratification

b. Son épaisseur;

c. Son faciès.

Stratification: Agencement en couches, ou strates, de dépôts successifs et horizontaux des sédiments.

Faciès: C'est l'ensemble des caractères pétrographiques et paléontologiques qui caractérisent une roche. (Dercourt, et al., 2012).

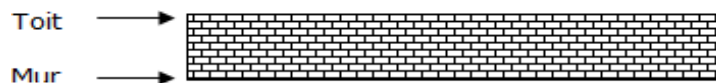
La stratigraphie permet de reconstruire les événements géologiques grâce à l'établissement d'une chronologie relative des terrains par l'application des principes.

✚ Les principes fondamentaux de la stratigraphie

a. Principe d'actualisme (principe d'uniformitarisme) :

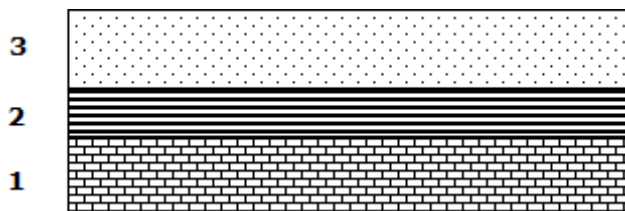
- Les lois régissant les phénomènes géologiques actuels étaient également valables dans le passé.
- Les mêmes causes ont les mêmes effets.
- Les structures géologiques passées ont été formées par des phénomènes (tectoniques, magmatiques, sédimentaires ou autres) agissant comme à notre époque.

b. Principe d'horizontalité: Les couches sédimentaires se déposent horizontalement.



c. **Principe de superposition,** Dans leur disposition originelle, les strates sont généralement horizontales, et superposées dans l'ordre chronologique de leur dépôt.

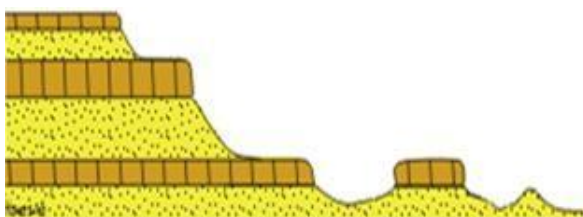
- Les couches géologiques les plus basses sont les plus anciennes : Si une couche 1 est sous une couche 2, alors 1 est plus ancienne que 2.



La couche la plus jeune se dépose au-dessus de la plus vieille dans une séquence sédimentaire. La disposition des âges dans une carte géologique, suit le principe de superposition : terrains plus jeunes en haut, et les plus vieux en bas.

d. Principe de continuité:

- Une même couche a le même âge sur toute son étendue.
- Une couche possède, en général, le même âge sur toute sa longueur.



L'érosion peut altérer la continuité des strates rocheuses sur de courtes ou longues

e. Principederecoupe (Principedelarelacionde recoupe):

- Lorsqu'unecoucheestrecoupéeparunefailleouunfilon,alorscettecoucheest plus ancienne quela faille ou le filon.
- Les couches sédimentaires sont plus anciennes que les failles ou les roches qui les recourent.
- Indiquequ'unefigureou unecouchequienrecoupeuneautre doit être plus récent.

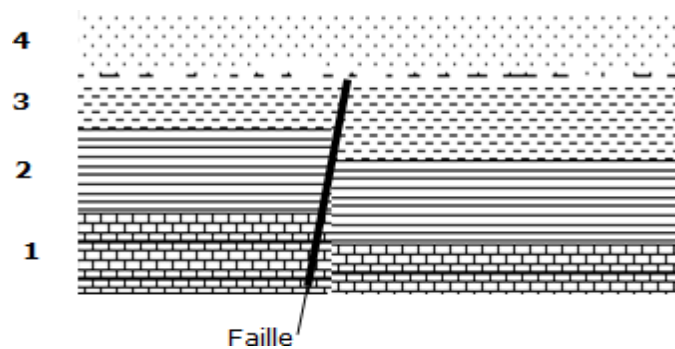


Fig.20:Principederecoupe (Faille affectant la géométrie des strates)

Dans cet exemple, la faille F affecte les strates 1, 2 et 3 mais pas la strate 4. Elle est donc plus récente que 3 mais plus ancienne que 4.

f. Principed'inclusion (Principedefragmentsinclus) :

- Les morceaux de roche inclus dans une autre couche sont plus anciens que leur contenant.
- Un objet inclus dans une couche est antérieur à cette couche.
- Permet de dire que des débris de roches plus anciennes peuvent être inclus dans une couche plus récente mais jamais l'inverse.

Les inclusions sont considérées comme des objets (galets, fossiles) emprisonnés dans une strate. Toute inclusion est plus ancienne que la structure qui l'entoure. Dans le cas d'un filon rocheux issu de l'injection de magma dans une faille, le filon sera plus récent que la roche.



Lithostratigraphie: Partie de la stratigraphie relative à l'organisation des strates dans des unités basées sur leurs caractères lithologiques (pétrographiques). L'unité fondamentale en lithostratigraphie est la **formation**.

○ **Catégorie lithostratigraphique** représente un ensemble **des termes d'unités stratigraphiques** :

- Groupe.
- Formation.
 - Membre.
 - Couche.

Formation: Est un *ensemble de couches sédimentaires* défini géographiquement par un nom de lieu et présentant une somme de caractères lithologiques et paléontologiques suffisants pour être régionalement un élément de repère.

• **Biostratigraphie:** Partie de la stratigraphie relative à l'organisation des strates dans des unités basées sur leur contenu fossilifère. L'unité fondamentale en biostratigraphie est le **biozone**.

○ **Catégorie biostratigraphique** représente un ensemble **des termes d'unités stratigraphiques**: Biozones :

- Zones d'association.
- Zones d'extension.
- Zones d'apogée.
- Zones d'intervalle.

Biozone: Est une association de faune ou de flore caractéristique ayant vécu un laps de temps donné, souvent inférieur à celui de l'étage.

• **Chronostratigraphie:** Partie de la stratigraphie relative à l'organisation des strates dans des unités basées sur leur relation d'âge. L'unité fondamentale en chronostratigraphie est **l'étage**.

○ **Catégorie chronostratigraphique** représente un ensemble **des termes d'unités stratigraphiques**.

La **durée** correspondant aux dépôts (couches) est une **unité géochronologique**.

<u>Unités stratigraphiques</u> (Stratomères)	>>>	<u>Unités Géochronologiques équivalentes.</u> (Chronomères)
• Eonothème.	>>>	• Eon.....ex Protérozoïque.
• Erathème.	>>>	• Ere.....ex Paléozoïque
• Système.	>>>	• Période..... ex Crétacé.
• Série.	>>>	• Epoque..... ex Néogène.
• Etage.	>>>	• Ageex Cénomanién.
• Chronozone.	>>>	• Chron.

Étage: Division de base de la stratigraphie, l'étage est défini par rapport à un affleurement type, nommé **stratotype** qui sert, en quelque sorte, d'étalon. Le nom donné à l'étage est souvent celui du point géographique où se situe le stratotype, auquel on rajoute le suffixe "ien" (Lutécien, Aptien, etc.).

Le **stratotype** est l'affleurement-type (étalon) qui permet de définir un étage géologique, c'est-à-dire un étage de l'échelle stratigraphique.

✚ Définition des unités Chronostratigraphiques :

Plusieurs **Chronozones** forment une **étage** (équivalent géochronologique : **Age**).

Plusieurs **étages** forment une **série** (équivalent géochronologique : **époque**).

Plusieurs **séries** forment un **système** (équivalent géochronologique : **période**).

Plusieurs **systèmes** forment un **érathème** (équivalent géochronologique : **ère**).

Plusieurs **érathèmes** forment un **éonothème** (équivalent géochronologique : **éon**).

Eon: La plus grande unité géochronologique. Sa durée est de plusieurs centaines de millions d'année, il est subdivisé en **Eres**.

Ère: Est une unité géochronologique, formée par la réunion de plusieurs périodes. Une **ère géologique**, chacune des cinq grandes divisions de l'histoire de la Terre.

Les temps géologiques ont été subdivisés en deux éons: - L'**éon Cryptozoïque** (du grec signifiant Vie cachée) qui est un synonyme du **Précambrien = Palé-ochron = Antécambrien**, de - 3 800 Ma à - 540 Ma ;

L'**éon Cryptozoïque** est lui-même divisé en trois ères:

- L'**ère Hadéenne** de -4600 à -4000 Ma ;
- L'**ère Archéenne** de -4000 à -2500 Ma ;
- L'**ère Protérozoïque** de -2500 à -542 ± 1 Ma ;

- L'**éon Phanérozoïque** (du grec Evidencedevie = Néochron, de -542 ± 1 Ma à aujourd'hui.

L'**éon phanérozoïque** est lui-même divisé en trois ères:

- L'**ère Paléozoïque** (du grec Vie ancienne) ou **Primaire**,
- L'**ère Mésozoïque** (du grec Vie moyenne) ou **Secondaire**,
- L'**ère Cénozoïque** (du grec Vie récente) qui regroupe le **Tertiaire** et le **Quaternaire**.

Ces ères sont elles-mêmes subdivisées en **systèmes**, par exemple l'**ère Secondaire** comprend les systèmes **Triasique** (ou **Trias**), **Jurassique** et **Crétacé**.

Systèmes et Périodes: Ils'agit de la subdivision des Eres, elles sont d'une durée moyenne 44

de 20 Ma à 70 Ma. La limite inférieure est celle de l'étage le plus jeune et la limite supérieure celle de l'étage le plus vieux.

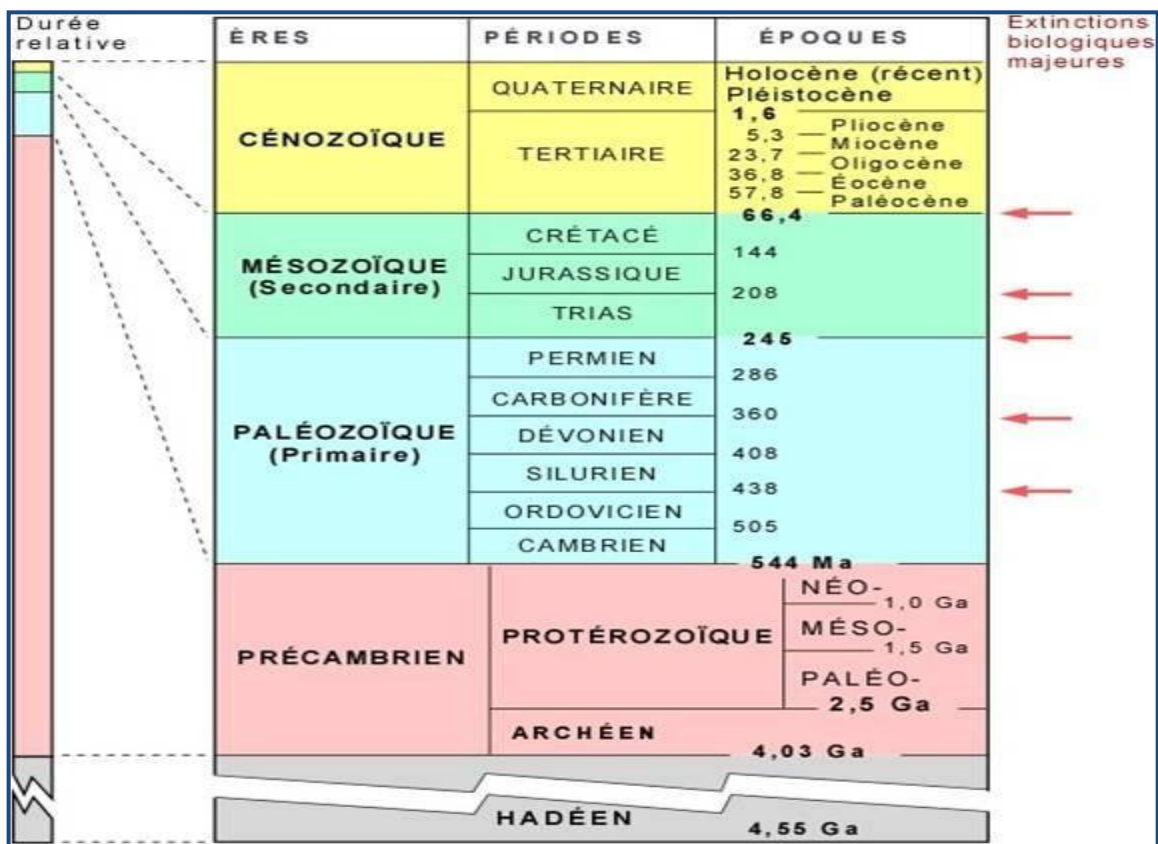
Séries et Epoques : Il s'agit de la subdivision des périodes, elles sont d'une durée moyenne de 15 Ma (excepté pour le quaternaire). Leurs limites sont définies selon les mêmes règles que la période (inférieur, moyen, supérieur).

Etage et Age : Il s'agit de l'unité chronostratigraphique la plus employée et la plus ancienne historiquement, deux étages successifs sont séparés par des hiatus, lacunes de sédimentation, discordances ...et sont associés à des cycles sédimentaires.

1- En conclusion, la méthode de datation relative permet d'organiser les structures et les événements géologiques les uns par rapport aux autres dans le temps, mais sans les dater précisément.
 2- Néanmoins grâce à cette chronologie, on a pu établir l'échelle stratigraphique des temps géologiques à partir de données lithologiques et du contenu paléontologique des différentes couches de terrain.

✚ Echelle stratigraphique

La biostratigraphie et les méthodes de géochronologie permettent de reconstituer l'histoire géologique d'une région donnée. Les recoupements généralisés à l'échelle du globe ont permis d'établir un calendrier de référence appelée *échelle stratigraphique internationale des temps géologiques*, qui comprend les subdivisions suivantes (Tableau 4): **Tab. 4: Echelle stratigraphique et principales extinctions biologiques majeures**



Extinction biologique (Crise biologique) : Est une période «courte» des temps géologiques au cours de laquelle un grand nombre **d'espèces** différentes, occupant des milieux différents, disparaissent à l'échelle mondiale. La crise *Crétacé-Tertiaire* est l'une des crises les plus connues. Se produit dans un laps de temps court au regard des temps géologiques (de l'ordre de la centaine de milliers, voire de l'ordre du million, d'années) (Billet, et al., 2007).

II. 4.7.2.2. Les méthodes paléontologiques (La signification des fossiles)

✚ Notion de Paléontologie

- **Paléontologie:** (gr. paléo = palaios, ancien ; ontoc, être = créature, et logos = science), étude scientifique des fossiles laissés dans les sédiments par les êtres ayant vécu aux époques géologiques.

- La **paléontologie** s'intéresse à l'étude des êtres fossiles, animaux, végétaux et micro-organismes. Celle-ci est très en rapport avec la stratigraphie lorsqu'elle permet la détermination de l'âge des couches géologiques grâce à l'examen de leur contenu en fossiles.

- **Fossile:** c'est une empreinte minérale (ou une relique prisonnière d'une résine végétale comme de l'ambre) d'un être vivant, animal ou végétal. Elle peut être toute ou partie de l'organisme, ou son empreinte laissée dans le sédiment.

- **Fossilisation:** ensemble des processus qui permettent le passage de la matière organique d'un organisme mort à une empreinte minérale. Pour avoir une bonne fossilisation, il faut un taux de sédimentation important et un enfouissement rapide ainsi qu'un milieu anoxique (sans oxygène) (Denys, 2002).

✚ Les différents types de fossilisation

- Lamomification;
- L'enrobement;
- L'incrustation (formation d'une croûte)
- Laminérisation.

✚ Conditions de fossilisation

- Existence de parties dures dans l'animal.
- Aptitude de ces parties à être conservées par épigénie.
- Milieux favorables.

✚ **Fossile stratigraphique (fossile-marqueur):** Un fossile est dit stratigraphique quand les quatre conditions suivantes sont

- Une large répartition géographique; un grand nombre d'individus;
- Une courte présence temporelle dans l'histoire de la Terre;
- Une indépendance complète de l'animal vis-à-vis de son environnement. Ce sont généralement des invertébrés marins.

❖ **Les caractères d'un fossile stratigraphique:**

- Une grande répartition géographique;
- Une relative faible extension verticale dans les dépôts.

✚ **La différence entre un « bon fossile » dateur (chronologique) et un « bon fossile » environnemental :**

Tab.5: Les fossiles, outils de datation

Bon fossile	
Chronologique (Datation)	Environnemental (Paléoécologie)
- Évolution rapide - Peu sensible au milieu Exemple : Ammonites	- Évolution lente - Biotope étroit Exemple : Coraux

✚ **Le principe d'identité paléontologique:**

- Deux couches ayant les mêmes fossiles sont considérées comme ayant le même âge.
- Deux couches ou deux séries de couches sédimentaires de même contenu paléontologique en fossiles stratigraphiques (et de lithologie différente ou pas) ont le même âge.

Les fossiles sont caractérisés par une extension géographique maximale et une extension chronologique minimale.

Les "mauvais" fossiles présentent une forme constante pendant une longue durée.

Ce principe n'est pas lié aux rapports géométriques entre les couches, mais à la paléontologie; il se base sur l'existence de fossiles stratigraphiques. Il permet de corrélérer des séries sédimentaires de régions éloignées.

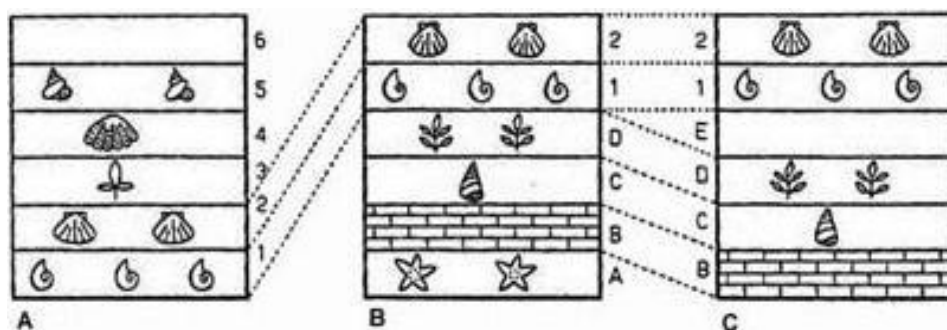


Fig.21: Exemple d'identité paléontologique

Chronologie absolue

La chronologie absolue mesure des durées des phénomènes géologiques et des objets géologiques (roche, minéral) grâce à des techniques qui s'appuient sur **la désintégration radioactive d'isotopes** de certains éléments chimiques. La radioactivité correspond à des changements naturels ou artificiels du nombre de protons et de neutrons de noyaux dits instables. Les isotopes radioactifs majeurs **P** (pères = atomes instables) et leurs produits **F** (fils = atomes stables) utilisés en géologie sont : $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$, $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$, $^{235}\text{U}/^{207}\text{Pb}$, $^{232}\text{Th}/^{208}\text{Pb}$, $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$ (pour les longues durées) et $^{14}\text{C}/^{14}\text{N}$ (pour les courtes durées). (Driss F., 2010).

Le tableau ci-après donne une idée sur les tranches d'âge pouvant être obtenues en étudiant quelques couples d'isotopes:

COUPLES D'ISOTOPES	PERIODES	AGES MESURES
$^{238}\text{U} / ^{206}\text{Pb}$	4,47 GA	> 25 MA
$^{87}\text{Rb} / ^{87}\text{Sr}$	48,8 GA	> 100 MA
$^{40}\text{K} / ^{40}\text{Ar}$	1,31 GA	1 à 300 MA
$^{14}\text{C} / ^{14}\text{N}$	5 730 années	100 à 50 000 ans

Principes de datation radiométrique:

La loi de la *désintégration* est la même pour chaque élément radioactif même si le taux de désintégration varie d'un élément à un autre. Un élément **P** radioactif se désintègre progressivement en élément **F**. Cette désintégration est beaucoup plus abondante qu'il s'est écoulé plus de temps.

La figure ci-dessous montre que la proportion d'atomes pères (P) qui se désintègrent pendant chaque unité de temps (dt) est toujours la même. Le nombre d'atomes pères se désintégrant diminue de manière continue en même temps que le nombre d'atomes fils augmente proportionnellement.

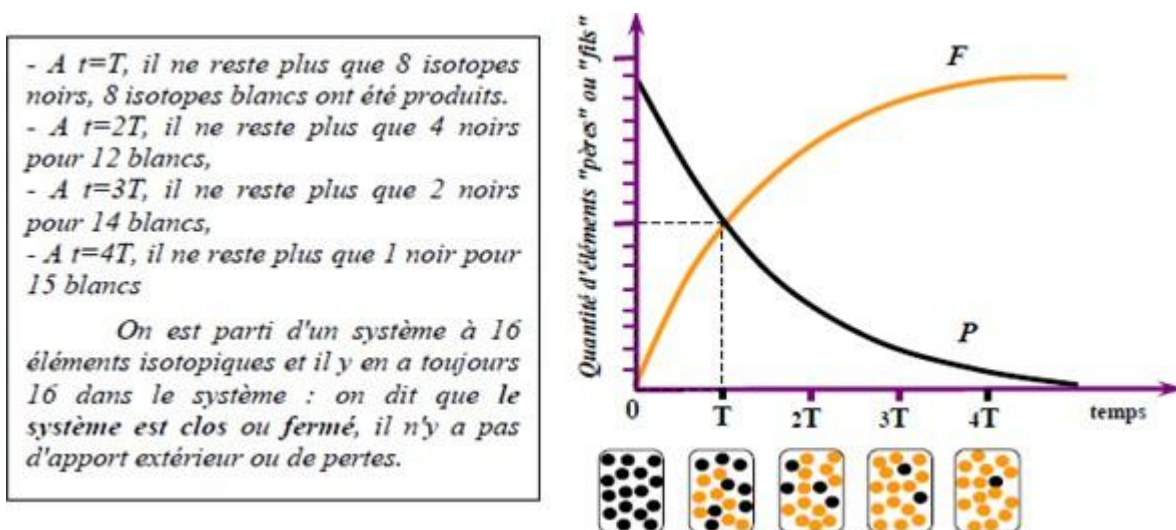


Fig.22: Désintégration des éléments radioactifs

La désintégration de l'élément **P** suit une loi exponentielle exprimée par une équation qui décrit le changement (**dP**) du nombre d'atomes pères (**P**) par intervalle de temps (**dt**):

$$dP/dt = -\lambda \cdot P_0, \text{ où :}$$

P₀: Est le nombre initial d'atomes pères;

P: Nombre d'atome à l'instant **t** ;

λ: Est la constante de désintégration de l'élément radioactif et elle s'exprime en an⁻¹. Cette équation s'intègre en fonction du temps :

$$P = P_0 e^{-\lambda t}, \text{ ou bien : } P_0 = P e^{\lambda t}$$

Comme **P₀ = P + F**, l'intégration de cette équation donne **t = 1/λ · log_n(1 + (F/P))** (I)

Chaque élément radioactif, est également, caractérisé par sa **période ou demi-vie T** au bout de laquelle la moitié de l'élément père **P** s'est désintégré.

$$P_0/2 = P_0 e^{-\lambda T} \text{ ----- } \Rightarrow \lambda = \log_2/T.$$

$$\text{-----} \Rightarrow T_{1/2} = (1/\lambda) \log_2.$$

En général, nous ne connaissons pas la valeur de **P₀**, mais nous pouvons mesurer le nombre d'atomes pères **P** et celui de fils **F** dans un échantillon. On détermine alors le rapport **F/P**; ce qui suppose que l'élément **F** n'est pas lui-même radioactif.

Dans la pratique on utilise la formule **t = 1/λ · log_n(1 + (F/P))**

Dans beaucoup de cas il faut tenir compte du fait que des isotopes **F** peuvent exister au départ (**F₀**) dans la roche indépendamment de la radioactivité de **P**. On a alors : **F = F₀ + F*** **F*** : Est le produit de désintégration de **P**, on a : **F* = P₀ - P**

$$\text{Comme } P = P_0 e^{-\lambda t}, \text{ ou bien } P_0 = P e^{\lambda t}$$

On aura : **F* = P(e^{λt} - 1)** et donc **F mesuré = F_{0 initial} + P mesuré (e^{λt} - 1)** (II)

4.7.3.2. Méthodes de datation des périodes anciennes

✓ **Laméthode Rb (rubidium) / Sr (strontium).**

Lors de la formation d'une roche magmatique, du rubidium et du strontium sont intégrés dans les réseaux cristallins de certains minéraux (micas, feldspaths). Chacun de ces éléments se présente sous plusieurs formes isotopiques: ⁸⁵Rb et ⁸⁷Rb d'une part, ⁸⁸Sr, ⁸⁷Sr, ⁸⁶Sr et ⁸⁴Sr d'autre part.

✓ **Laméthode K (potassium) / Ar (argon).**

Le ⁴⁰K se désintègre en ⁴⁰Ar: (T = 1,31 milliards d'années et λ = 5,81 · 10⁻¹¹ an⁻¹).

Dans cette méthode, c'est la quantité ⁴⁰Ar (**F**) formé au cours du temps que l'on va mesurer, car avant la fermeture du système l'argon formé par désintégration de ⁴⁰K est éliminé dans le milieu (dégazage du magma au cours de sa progression vers la surface, par

exemple). Lorsque la température est devenue assez basse pour que la cristallisation soit achevée, le système se ferme et le chronomètre isotopique est remis à zéro. L'âge de la roche est donc l'âge de la fin de son refroidissement.

II.4.7.3.3. Une méthode de datation des périodes récentes: la méthode au ^{14}C

Le ^{14}C ; le carbone 14 (6 protons et 8 neutrons). Est un isotope du ^{12}C (6 protons et 6 neutrons). Il provient du cosmos et, est contenu en trace dans le CO_2 de notre atmosphère. Chaque être vivant en contient une quantité précise et connue.

Lors de la mort de cet être, le ^{14}C se désintègre avec une demi-vie de 5710 ans. Le rapport entre la quantité de ^{14}C totale et la quantité restante de l'élément à dater donne un âge très précis. On utilise cette méthode pour dater des os ou des bois ; son utilisation permet de remonter jusqu'à 40'000 ans.



Chapitre III:
Géodynamique interne

Chapitre III: Géodynamique interne

La géodynamique interne (la dynamique interne de la Terre): ce sont les forces tectoniques induites par les mouvements convectifs lents du manteau et les déplacements consécutifs de l'écorce terrestre. Les contraintes imposées à la lithosphère peuvent engendrer des phénomènes soudains, tels que les éruptions volcaniques et les séismes.

Sismologie

Étude des séismes

III.1.1.1. Définitions

- **Sismologie** : (gr. *seismos*, **secousse**, *logos*, **science**) - Science qui analyse les causes des tremblements de terre et la propagation des ondes dans et à la surface du globe.

- Il s'agit d'un ébranlement brutal du sol provoqué par l'arrivée d'ondes élastiques initiées, en profondeur, à la suite d'une rupture et d'un mouvement relatif brusque de deux comportements lithosphériques. Il en résulte une libération instantanée d'énergie élastique qui s'était lentement accumulée. (Pomerolet *al.*, 2006).

- **Caractéristiques principales** : Le point d'origine d'un séisme est appelé **hypocentre** ou **foyer sismique**. On parle de **l'épicentre** du séisme, qui est le point de la surface de la Terre qui se trouve à la verticale de l'hypocentre. Il s'agit le lieu dans le plan de faille où se produit réellement le séisme, alors que **l'épicentre** désigne le point à la surface terrestre à la verticale du foyer (1^{er} endroit touché par les ondes).

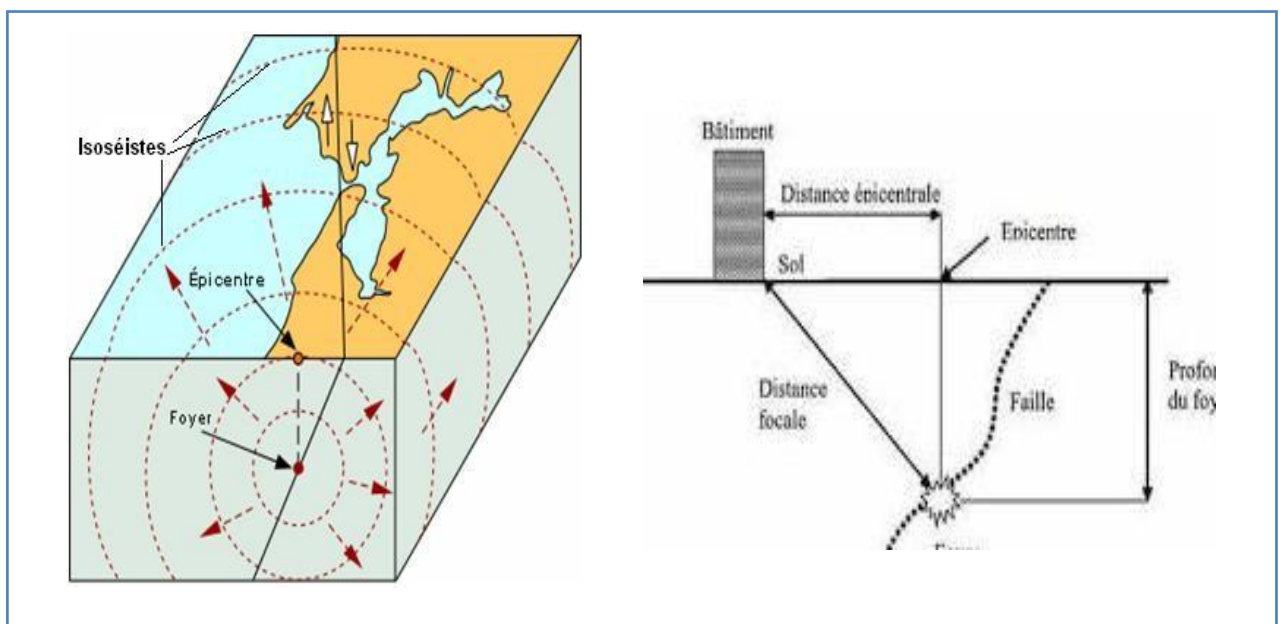


Fig.23a: Foyer et épicentre d'un séisme
(Source: Bourque, 2004).

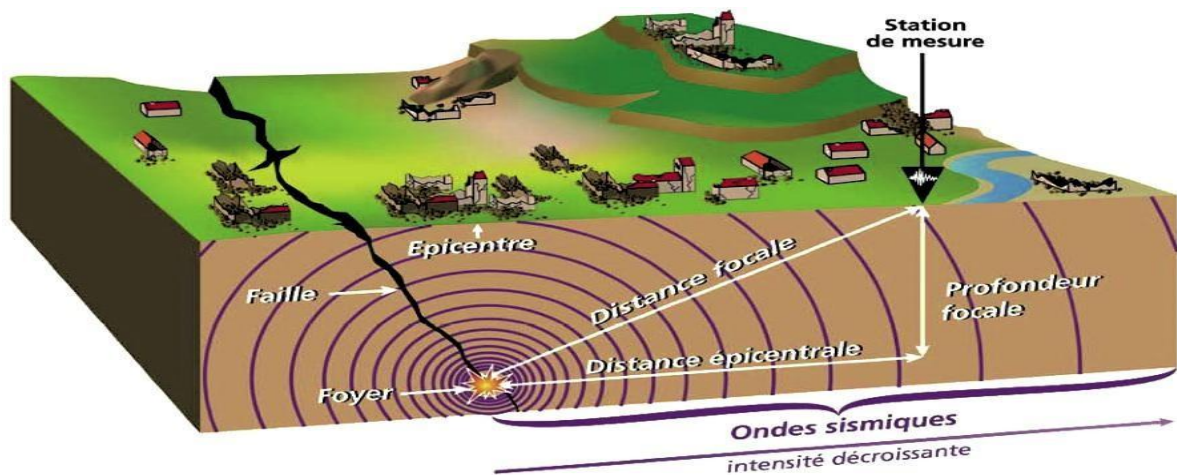


Fig.23b: Foyer et épiscentrale d'un séisme
(Source : <http://www.maxicours.com>).

**Enregistrement et étude d'un séisme (Étude de la propagation des ondes sismiques):
Enregistrement des tremblements de Terre: Sismographe- Principe du pendule -**

L'enregistrement d'un séisme est effectué par un appareil appelé **sismographe**. Le **sismographe** est un pendule lourd suspendu à un support lié au sol.

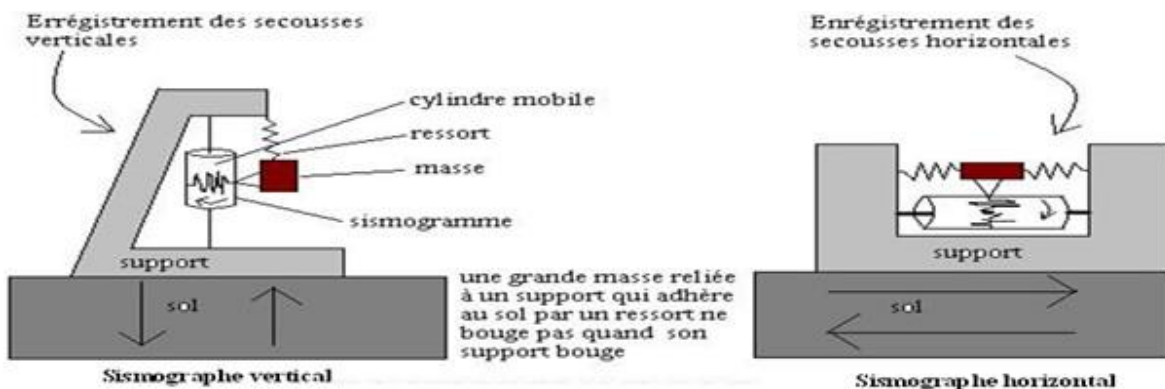


Fig.24: Principe du sismographe

Le **principe du sismographe** est le suivant: Une masse ne bouge pas lorsque son support bouge. Il doit exister trois (03) sismographes: deux sismographes mesurant (enregistrent) les mouvements horizontaux placés à 90 l'un de l'autre : N-S; E-W. Un (01) l'autre enregistre les mouvements verticaux.

Pour mesurer le mouvement vertical, les sismographes emploient une masse lourde supportée par un ressort. Le ressort est attaché au support qui est lui-même connecté à la terre. Lorsque la terre vibre, le ressort se comprime et se décomprime, mais la masse reste presque stationnaire.

Pour mesurer le mouvement horizontal, la masse lourde est suspendue comme un pendule - il y a un appareil pour mesurer les mouvements est-ouest et un autre pour mesurer les mouvements nord-sud. Les sismographes modernes sont capables de détecter des vibrations aussi petites que 10⁻⁸ centimètre. La courbe dessinée par le sismographe s'appelle : **Sismogramme**.

Propagation des ondes sismiques :

On distingue deux types d'ondes, les ondes de volume qui traversent la Terre et les ondes de surface qui se propagent à sa surface (**Emmanuel et al., 2007**) :

a. Les ondes de volume (de fond) : Elles prennent naissance au foyer et se propagent à l'intérieur du manteau terrestre sous deux formes :

- Les ondes longitudinales se caractérisant par des compressions et dilatations alternées se propageant à une vitesse de 7 à 8 km/s ;

- Les **ondes P** ou ondes primaires appelées aussi ondes de compression ou ondes longitudinales sont des ondes de compression-dilatation qui déplacent les particules parallèlement à leur direction de propagation. Ce sont les plus rapides (6 km.s⁻¹ près de la surface) et sont enregistrées en premier sur un sismogramme. Elles se transmettent dans les **milieux solides et liquides**.

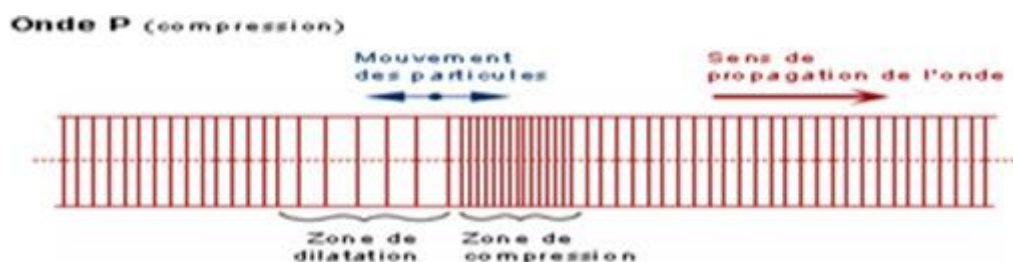


Fig.25: Ondes sismiques de type P (Source: Bourque, 2004).

- Les ondes transversales se caractérisant par une distorsion dans le plan perpendiculaire à la direction de propagation, provoquant du cisaillement et se propageant à une vitesse de 4 à 5 km/s.

- Les **ondes S** ou ondes secondaires appelées aussi ondes de cisaillement ou ondes transversales déplacent les particules perpendiculairement à leur direction de propagation.

Ces ondes ne se propagent pas dans les **milieux liquides**, et sont arrêtées par le noyau de la Terre. Leur vitesse est plus lente que celle des ondes P, elles apparaissent en second sur les sismogrammes.

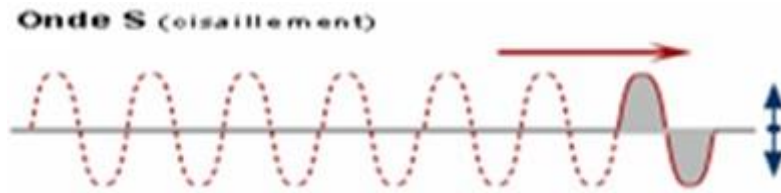


Fig.26: Ondes sismiques de type S (Source: Bourque, 2004).

b. Les ondes de surface : Elles sont générées par les ondes de volume qui arrivent à la surface et se propagent à la vitesse de 1,5 à 5 km/s. On distingue :

- Les ondes de RAYLEIGH pour lesquelles les points du sol décrivent des ellipses dans le plan vertical ; elles entraînent des compressions et des cisaillements dans le sol ;

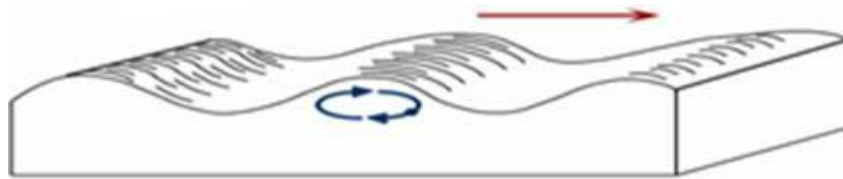


Fig.27: Ondes sismiques de RAYLEIGH (Source: Bourque, 2004).

- Les ondes de LOVE pour lesquelles les points du sol se déplacent tangentiellement à la surface, perpendiculairement à la direction de propagation ; elles n'entraînent que des contraintes de cisaillement.



Fig.28: Ondes sismiques de LOVE (Source: Bourque, 2004)

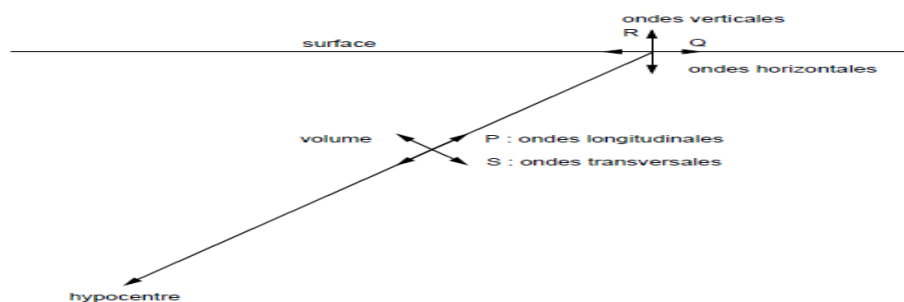


Fig.29: Ondes sismiques de volume et de surface

Localisation d'un tremblement de terre à la surface de la planète

- En moins d'une heure après un tremblement de terre, on nous annonce son épicerne.
- Comment arrive-t-on à localiser aussi rapidement et avec autant de précision un séisme?

Les ondes P se propagent plus rapidement que les ondes S ; c'est cette propriété qui

permet de localiser un séisme. Les ondes sismiques sont enregistrées en plusieurs endroits du globe par des appareils qu'on nomme, **Sismographes**. En gros, il s'agit d'un appareil capable de "sentir" les vibrations de la croûte terrestre; ces vibrations sont transmises à une aiguille qui les inscrit sur un cylindre qui tourne à une vitesse constante. On obtient un enregistrement du type de celui-ci.

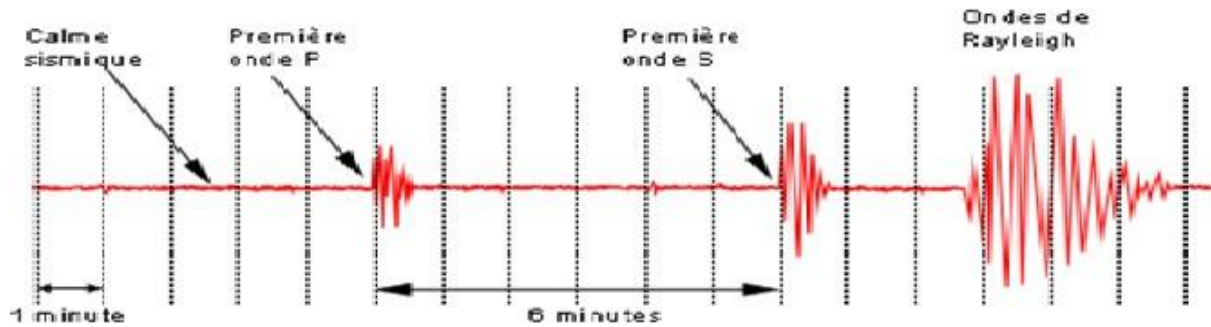


Fig.30:Sismogramme

Différents temps de propagation des ondes sismiques P, S et de surface montrés par un sismogramme. Les ondes P sont les premières ondes sismiques qui arrivent au sismographe, puis les ondes S et enfin les ondes de surface.

L'intervalle de temps ou le retard entre les arrivées des ondes P et S est fonction de la distance traversée par les ondes (**Source : <http://www.maxicours.com>**).

Les méthodes d'étude des séismes (Mesure d'un tremblement de terre):

Intensité et magnitude :

✚ **Intensité:** Est définie en un lieu par rapport aux effets produits par un séisme (effets et conséquences du séisme en un lieu donné). Les **lignes d'égalité de force (intensité)** d'un tremblement de terre s'appellent **isoséistes**.

Différentes échelles d'intensité ont été définies qui classent les effets sismiques suivant leur importance croissante et à l'aide de descriptions conventionnelles :

- L'échelle de **MERCALLI** en 1902 décrit les effets communément observés des tremblements de terre sur l'environnement, les constructions, l'homme ;
- L'échelle **MSK/Medvedev-Sponheuer-Karnik/** en 1964 (ou **MERCALLI** modifiée), plus précise que la précédente, prend en compte pour l'évaluation des dégâts, le type de construction et le pourcentage des bâtiments affectés ;
- L'échelle **EMS/European Macroseismic Scale/** en 1992-1998 (ou **MSK et MERCALLI** modifiée), plus précise que la précédente, prend en compte pour l'évaluation des dégâts, le type de construction et le pourcentage des bâtiments affectés.

✚ **Magnitude:** Est une grandeur mesurant l'énergie libérée lors d'un séisme. Elle correspond à la puissance du séisme. C'est une valeur associée au séisme.

Est le logarithme décimal de l'amplitude maximale observée sur un sismogramme situé dans une station sismique distante de 100 Km de l'épicentre.

$$M = \log_{10} \frac{A}{T} + f(\Delta);$$

A – L'amplitude [microns];

T – Période [secondes];

f(Δ) – Terme empirique compensant l'amortissement du signal sismique en fonction de la distance (Δ).

M – Calculée à partir de la quantité d'énergie dégagée au foyer, graduée de 1-9.

M – Mesure de la force d'un séisme à partir de l'énergie libérée au foyer (échelle de RICHTER).

La magnitude d'un séisme peut être mesurée avec **plusieurs échelles**. Avec l'**échelle de Richter**, la magnitude d'un tremblement de terre mesure l'**énergie** libérée au foyer d'un séisme. Le principe est le suivant : plus l'énergie est élevée et plus élevée la magnitude.

La magnitude est calculée sur une échelle logarithmique : lorsqu'une énergie libérée est multipliée par 30 (ou si l'amplitude du mouvement est multipliée par 10), cela correspond à une augmentation de 1 sur l'échelle.

La magnitude, définie en 1935 par **RICHTER**, et l'échelle qui en résulte sont actuellement utilisées de façon universelle.

Tab.6. Comparaison entre les deux méthodes d'étude des séismes.

<i>Méthode (Echelle) de Mercalli / MSK/ EMS</i>	<i>Méthode (Echelle) de Richter</i>
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Méthode directe. ▪ Méthode macrosismique. ▪ Indique l'intensité d'un séisme, qui est déterminée par l'ampleur des dégâts et la perception de la population. ▪ Echelle graduée de I à XII. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Méthode indirecte. ▪ Méthode microsismique. ▪ Indique la Magnitude d'un séisme calculée à partir de la quantité d'énergie dégagée au foyer. ▪ Echelle graduée de 1 à 9.

Classification des tremblements de Terre

La classification des tremblements de terre se base sur un nombre de critères. Les plus importants sont :

➤ **Selon la profondeur du foyer, on distingue**

- Les séismes **superficiels**: la profondeur du foyer est inférieure à 60 km;

- Les séismes **intermédiaires**: le foyer est situé entre 60 et 300 km de profondeur;
- Les séismes **profonds**: la profondeur du foyer dépasse 300 km.

➤ ***Selon l'origine du séisme, on distingue les séismes d'origine tectonique et ceux d'origine non-tectonique***

- Les séismes **d'origine tectonique** sont directement liés aux mouvements de l'écorce terrestre le long de failles. C'est les plus importants (95 % des séismes enregistrés), les plus destructeurs et peuvent affecter de grandes superficies ;

- Les séismes **d'origine non-tectonique** peuvent être provoqués par des éruptions volcaniques, l'effondrement de cavités souterraines naturelles ou par de gros glissements de terrain. Ces séismes sont en général de faible intensité et concernent des superficies limitées.

➤ ***Selon l'intensité et la magnitude des tremblements de terre***

Une autre classification se base sur *l'intensité ou la magnitude* d'un séisme. La magnitude d'un séisme est différente de l'intensité et exprime la quantité totale d'énergie libérée lors d'un tremblement de terre.

- Il existe plusieurs échelles d'intensité: la plus utilisée est **l'échelle EMS (European Macroseismic Scale)** précisant l'ancienne échelle de Mercalli/MSK/. Elle compte 12 degrés, le degré 1 correspond à une secousse mesurée uniquement par les instruments, et les dégâts matériels ne sont importants qu'à partir de 8.

- L'échelle des magnitudes utilisée dans le monde est celle de Richter. Elle compte 9 degrés (tableau).

Données sismologiques et la structure interne du globe

Lors de séismes naturels (fracture des roches) ou de fortes explosions (nucléaire par exemple) il y a émission d'ondes sismiques parmi lesquelles :

- Les **ondes P** qui traversent tous les milieux;
- Les **ondes S** qui traversent les milieux solides et qui ne passent pas dans les liquides.

Après chaque séisme, les résultats obtenus concernant les vitesses des ondes P et S en fonction de la profondeur du globe terrestre sont toujours les mêmes. On les exprime sous forme de graphe = courbes des vitesses des ondes sismiques en fonction de la profondeur.

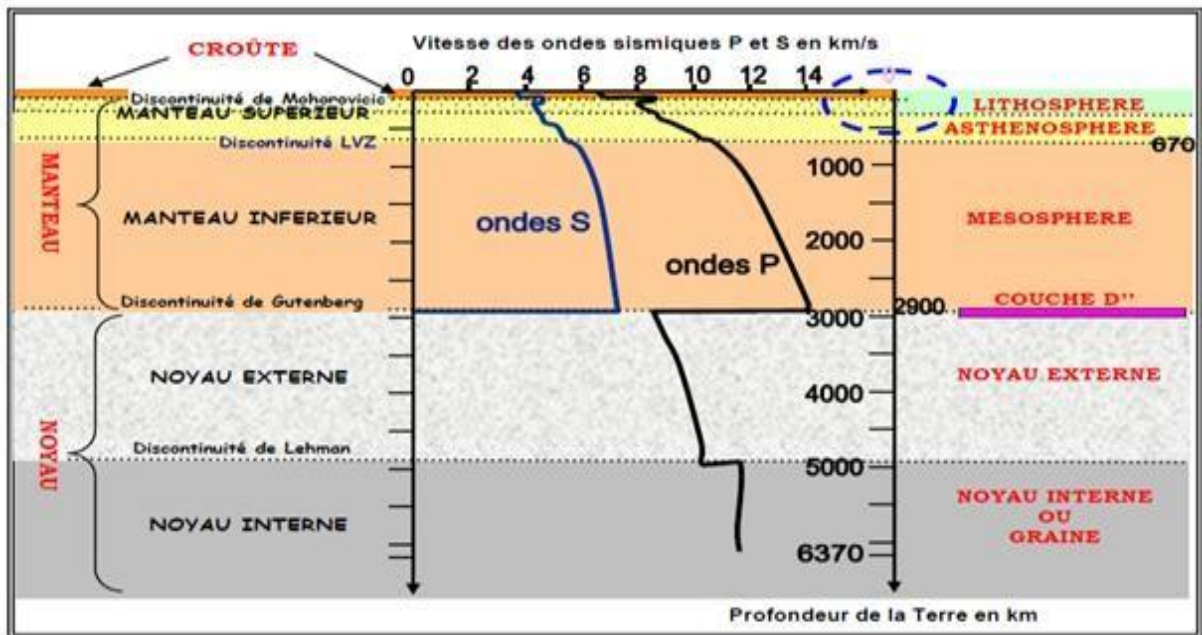


Fig.31: Structure interne du globe terrestre: modèle sismologique (Source: Moyen, 2011).

Causes des séismes

La plupart des tremblements de terre se produisent au niveau des failles qui délimitent les plaques tectoniques de l'écorce terrestre. Des tensions apparaissent lorsque ces plaques se déplacent mutuellement de manière lente. La libération soudaine de l'énergie de déformation ainsi accumulée dans la croûte terrestre, ou dans la couche sous-jacente appelée manteau, provoque un ébranlement local dont une partie de l'énergie se transforme en ondes sismiques à la surface de la terre. La création d'une faille ou, plus fréquemment, le glissement le long d'une faille existante, constituent le mécanisme générateur d'un séisme. L'hypocentre peut se situer à une profondeur très variable : quelques kilomètres à plus de 100 km.

- **Origine tectonique :** Les ébranlements viennent du jeu brutal de failles actives de plus ou moins grande extension. Les épicentres de ces séismes sont situés à la verticale des plans de subduction, dans les chaînes de montagne actives ou encore le long de failles en cisaillement. Les foyers sont situés en général entre 10 et 60 km de profondeur, mais on peut en trouver jusqu'à 700 km dans les zones de subduction.

- **Origine volcanique :** Les zones de rupture dans la croûte sont des régions où la lave peut monter à la surface. Les ébranlements proviennent principalement des chocs mécaniques à la montée des magmas, de l'explosion de bouchons colmatant la cheminée, de brusques débouffages de gaz, etc.

- **Explosions nucléaires souterraines** : Bien qu'aujourd'hui cette pratique ne soit plus guère appliquée, elle a cependant marqué l'histoire sismique de nombreuses régions des USA, de la Chine, de la Russie, du Japon et du Pacifique.

- **Barrages**: La création de lacs de retenue de grande profondeur modifie considérablement l'équilibre statique d'une région. Par ailleurs, ils induisent au droit de la retenue une augmentation importante des charges hydrauliques dans les fissures, accentuant ainsi leur ouverture et diminuant leur résistance au cisaillement.

- **Drainage par les ouvrages souterrains ou des puits profonds** : Lors de l'exécution de tunnels, l'eau souterraine est ordinairement drainée par l'ouvrage.

- **Effondrement de toits de cavités** : Ce peut être des cavités naturelles par dissolution de la roche (calcaires et gypse). La situation est plus grave dans l'affaissement des zones minières. Au cours des ans, ces piliers s'altèrent, se fissurent et finissent par rompre entraînant la rupture des piliers voisins et l'affaissement de grandes régions du territoire.

Effet d'un séisme, est double:

- Des vibrations (secousses) atteignent la surface et déplacent tous ses constituants, ce qui provoque des modifications topographiques accompagnées des dommages que l'on sait aux populations et aux constructions.

- Des vibrations (secousses) se propagent de proche en proche à l'intérieur du globe. Elles atteignent sa surface très loin de l'épicentre après avoir subi réflexions, réfractions.

Origine et répartition des tremblements de terre?

Origine des tremblements de terre?

Lorsqu'un matériau rigide est soumis à des *contraintes de cisaillement*, il va d'abord se *déformer de manière élastique*, puis, lorsqu'il aura atteint sa limite *d'élasticité*, il va se *rupturer*, en *dégageant de façon instantanée toute l'énergie* qu'il a accumulé durant la déformation élastique. C'est ce qui se passe lorsque *la lithosphère est soumise à des contraintes*. Sous l'effet des contraintes causées le plus souvent par *le mouvement des plaques tectoniques*, *la lithosphère accumule l'énergie*. Lorsqu'en certains endroits, *la limite d'élasticité est atteinte*, il se produit *une ou des ruptures qui se traduisent par des failles*. *L'énergie brusquement dégagée le long de ces failles cause des séismes (tremblements de terre)*. Lorsqu'un séisme est déclenché, un front d'ondes sismiques se propage dans la croûte terrestre.

Répartition des tremblements de terre

Les séismes n'ont pas une répartition aléatoire à la surface de la planète, mais sont répartis selon un patron bien défini. => 90% des séismes sont d'origine tectonique. Ce sont des séismes résultants de contraintes liées aux mouvements des plaques. **Séismes en bordure de plaque et séismes intra plaques.**

• **La répartition** des séismes à la surface du globe marque les limites des principales plaques lithosphériques.

• Les séismes profonds sont associés en général aux zones de subduction et sont provoqués par l'enfoncement de la lithosphère dans le manteau supérieur.

• Certaines régions du globe sont plus sismiques que d'autres. Les séismes ne sont en effet pas répartis au hasard, en observant **leur répartition** sur un planisphère, on constate qu'ils se situent dans des zones bien précises (Figure 34):

- A un niveau des chaînes de montagnes (comme l'Himalaya par ex.);
- Près des fosses océaniques (à un niveau du Japon ou de la chaîne des Andes);
- Le long des dorsales océaniques (dans le Pacifique, au milieu de l'Atlantique où la dorsale "croise" l'Islande,).

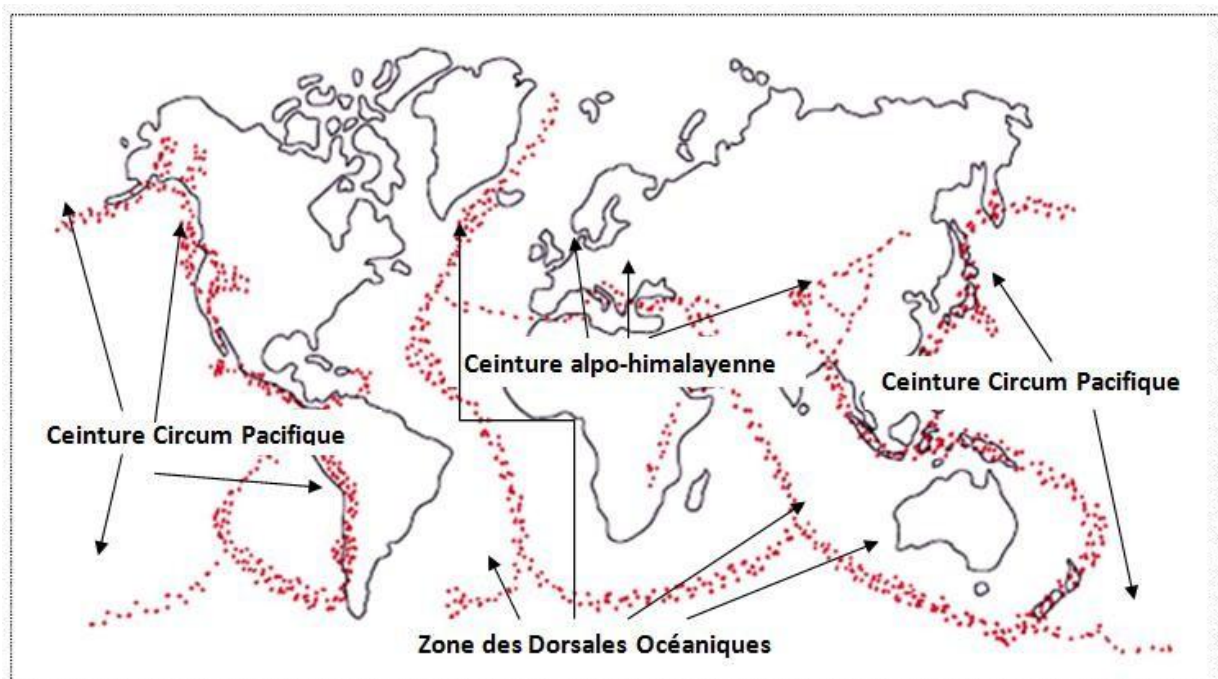


Fig.32: Carte de la distribution mondiale des tremblements de Terre (Source: Chabou, 2017)

Donc la distribution des séismes n'est pas hasardeuse mais elle suit une certaine logique que l'on peut résumer succinctement comme suit :

- Les séismes se trouvent le long de ceintures actives et assez étroites. Ces ceintures

ont les caractéristiques (Elles délimitent de vastes zones assez stables, coïncident avec la distribution des volcans et les crêtes des dorsales et elles apparaissent le long des zones d'affrontement entre deux plaques tectoniques) ;

- La quasi-totalité des épicentres des séismes se trouvent concentrée le long de trois types de ceintures (pacifique, trans asiatique et de dorsales océaniques) (**Baddari et al., 2002**).

Tectonique souple et cassante (plis et failles)

Introduction

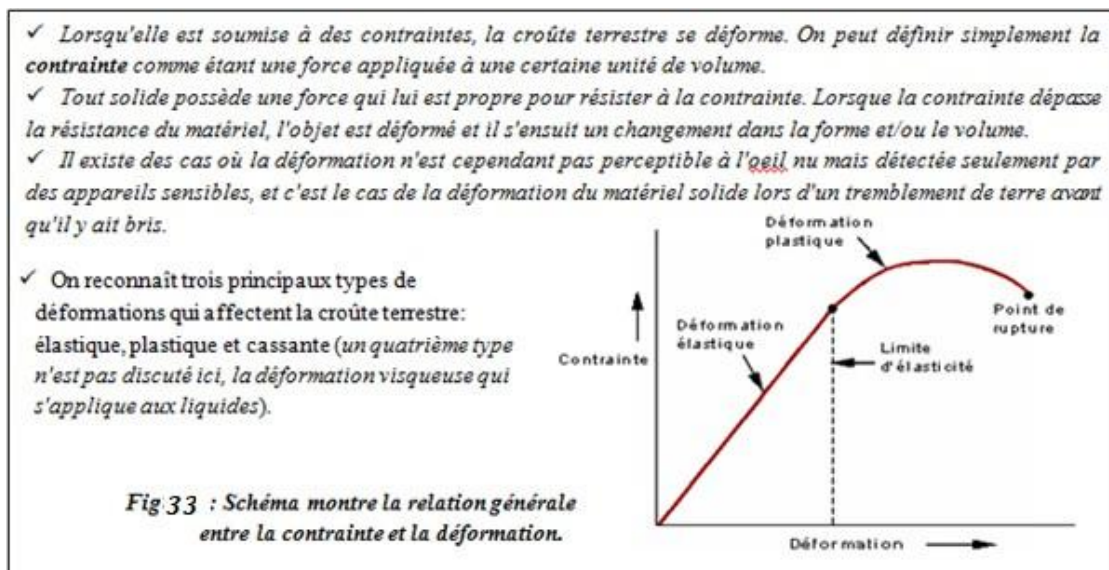
- Est la discipline des sciences de la Terre qui traite des déformations de l'écorce terrestre. (Étude de la structure, des mouvements et des déformations (*diastrophisme*) de l'écorce terrestre).

- La **tectonique**: Est l'étude de la déformation des roches qui constituent l'écorce terrestre. Les roches déformées sont organisées en « structures » (les plis, les failles, sont des structures tectoniques).

La **tectonique** est aussi appelée **géologie structurale** parce que les roches déformées sont organisées en « structures » (les plis, les failles, sont des **structures tectoniques**).

- La tectonique est la science de la déformation des roches que ce soit à l'échelle centimétrique ou à l'échelle des continents (**Jacques et al., 2016**).

****Diastrophisme-** (du grec *diastrophê, distorsion*): Est l'ensemble des déformations de l'écorce terrestre s'exprime de manière **cassante (failles)** ou **souple (plis)** (**Ibrahima S., 2010**).



La déformation des roches

La déformation cassante des roches: Les failles

- On appelle **faille** une cassure, une rupture de l'écorce terrestre qui partage un ensemble rocheux en deux compartiments décalés.

- Les failles sont des cassures accompagnées d'un déplacement relatif des deux compartiments, La valeur du décalage est le rejet, C'est le résultat d'un "cisaillement", dont

les effets se localisent sur une surface. Ne sont pas confondu avec les diaclases (simples cassures sans déplacement) (**Houti, 2012**).

Il existe d'autres types de cassures qui affectent les roches à des échelles différentes et qui ne sont pas des failles. C'est le cas de : - **La fracture** : c'est une cassure sans déplacement de quelques mètres.

- **La diaclase** : c'est une fissure sans déplacement dans un rocher en général.

✚ **Les éléments d'une faille** : on distingue :

- **Le plan de faille** : incliné vers le bloc affaissé.
- **Le miroir de faille** : le plan de faille quand celui-ci est intact.
- **Le rejet de la faille** : dénivelé verticale entre les points correspondants.

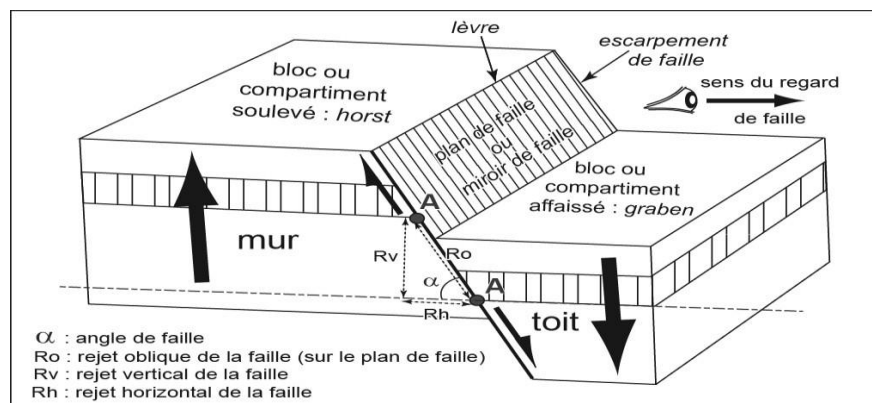


Fig.34: Les éléments d'une faille (Source: Khaldi, 2012).

✚ **Les types de faille** :

La définition structurale des failles dépend de l'inclinaison du plan de faille et du pendage des couches dans les blocs dénivelés ou de la pente de ces blocs dans le cas des structures cristallines.

A. Les déplacements horizontaux : Si les deux compartiments ont coulissé horizontalement l'un contre l'autre, on parle d'un décrochement. On peut distinguer deux cas : Décrochement dextre, c'est un décrochement vers la droite et Décrochement sénestre : c'est un décrochement vers la gauche

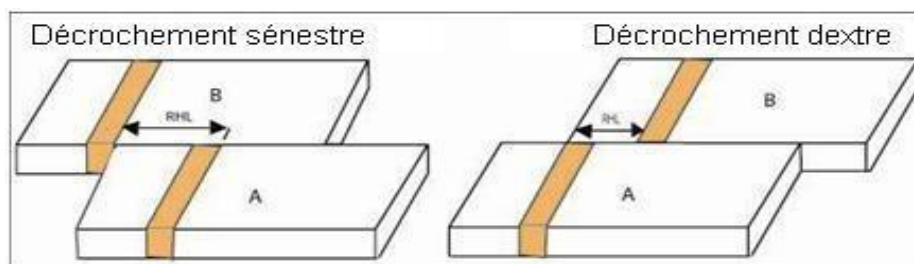


Fig.35: Les déplacements horizontaux de couches (Source: Moyen, 2009).

B. Les déplacements verticaux:

Si les deux compartiments ont coulissé verticalement l'un contre l'autre, on parle d'une faille. On peut distinguer deux cas:

✓ **Faille normale** : Elle correspond à un mouvement d'extension (détente) dans l'espace entre les deux blocs et à l'effondrement d'un bloc par rapport à un autre. Le plan de faille est incliné en descendant vers le bloc affaissé. Le déplacement sur une faille normale est proche de la ligne de plus grande pente du plan de faille et le mur descend relativement au toit (**Moyen, 2009**).

✓ **Faille inverse** : Elle correspond à un mouvement de compression ou de rapprochement entre deux blocs avec un rejet vertical pour l'un des deux blocs. Le plan de faille surplombe le compartiment affaissé. Le déplacement sur une faille inverse est aussi dans la ligne de plus grande pente et le mur monte par rapport au toit. (**Moyen, 2009**).

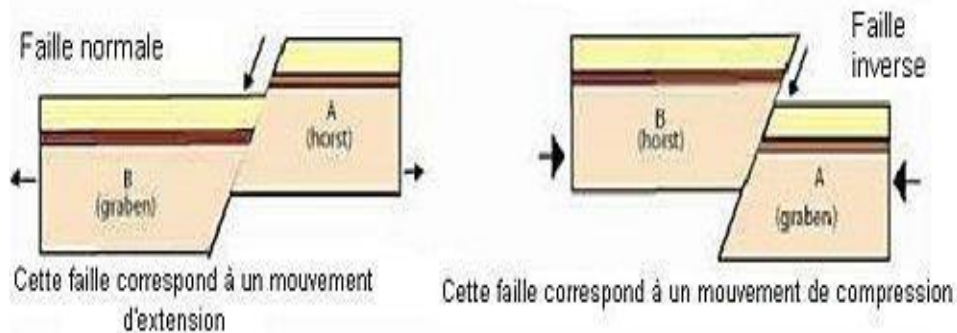
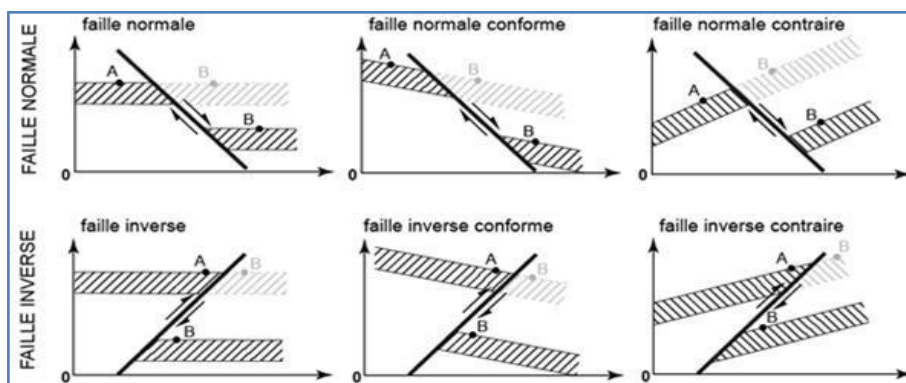


Fig.36: Les déplacements verticaux de couches (Source: Moyen, 2009).

Les failles peuvent aussi être classées en fonction de la position du plan de faille par rapport au pendage. On peut distinguer deux cas :

- Les **failles conformes**: elles présentent une continuité entre les pendages des couches géologiques et le plan de faille ;
- Les **failles contraires**: elles présentent une opposition entre le pendage des strates géologiques et le plan de faille.



Graben et Horst:

En géologie, un **graben** (terme d'origine allemande signifiant « fossé ») est un fossé tectonique d'effondrement entre des failles normales. Le compartiment surélevé par rapport au graben est appelé « **horst** ».

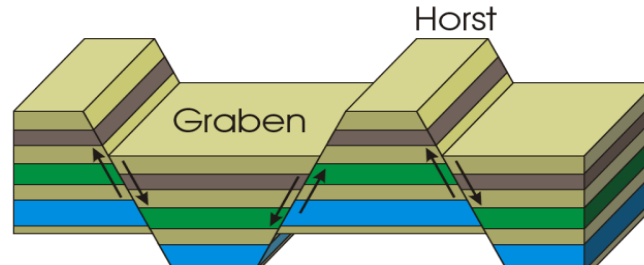


Fig.37: Les déplacements verticaux des couches Graben et Horst ([https://www.geowiki.fr/index.php?title=Horst et Graben](https://www.geowiki.fr/index.php?title=Horst_et_Grabén))

La reconnaissance d'une faille sur la carte géologique: Une faille se marque par un trait noir épais sur la carte géologique.

La déformation souple des roches: Les plis

- Ondulation des couches de terrain à la suite d'une activité tectonique.
- Manifestation ductile des couches rocheuses soumises à des contraintes de compression, formant des ondulations convexes et concaves diverses.
- Un **pli** est une structure courbe issue d'une déformation ductile de la roche. La connaissance de la forme avant la déformation permet de la quantifier. Le cas le plus simple est le pli de roches sédimentaires, dont la structure et les marqueurs sont planaires avant la déformation.

La reconnaissance d'un pli sur la carte géologique

Tab.8. Reconnaissance d'un pli sur la carte géologique

	Anticlinal	Synclinal
Pendage	 Divergents	 Convergents
Critère d'ancienneté	Une couche ancienne encadrée par de couches plus récentes.	Une couche récente encadrée par de couches plus anciennes.

Conditions préalables à un plissement

Présence d'une alternance de roches plastiques (argiles, marnes) et de roches dures (calcaires).

Les éléments d'un pli: Un pli se définit par divers éléments (fig.40) :

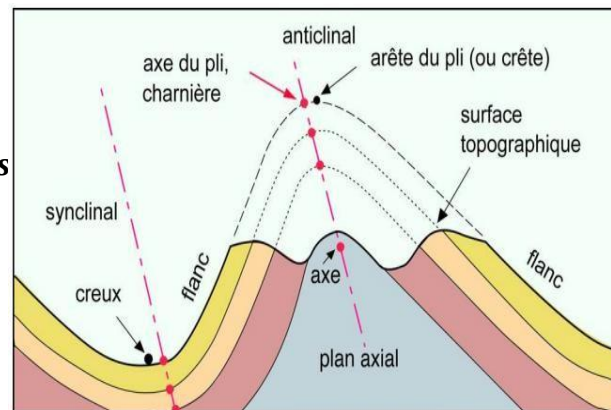
- La **charnière**, région où la courbure est maximale;

▪ L'**axe**, ligne passant par le milieu de la charnière.. En volume, ces axes définissent un **plan axial** du pli.

▪ Les **flancs** situés de part et d'autre de la charnière sont les régions où la courbure est minimale. Lorsque les deux flancs sont inclinés dans le même sens, on appelle **flanc normal** celui qui, pour un anticlinal ou antiforme, est situé au-dessus de la surface axiale, et en-dessous de cette surface pour un synclinal ou synforme. L'autre flanc s'appelle **flanc inverse** ;

▪ l'**angle d'ouverture**, angle dièdre que l'on peut mesurer si les flancs sont assez plats. Le pli est ouvert si l'angle est très important, serré si l'angle est faible et isoclinal si ses flancs sont parallèles.

Fig.38: Les principaux éléments permettant de décrire une structure plissée (Source: Pomeroy et al., 2006).



Types (classification) de plis

✓ Monoclinal, Anticlinal ou Synclinal

Ce type de pli est déterminé par la disposition et l'ordre des couches stratigraphiques (selon l'étirement des couches accompagnant leur plissement) :

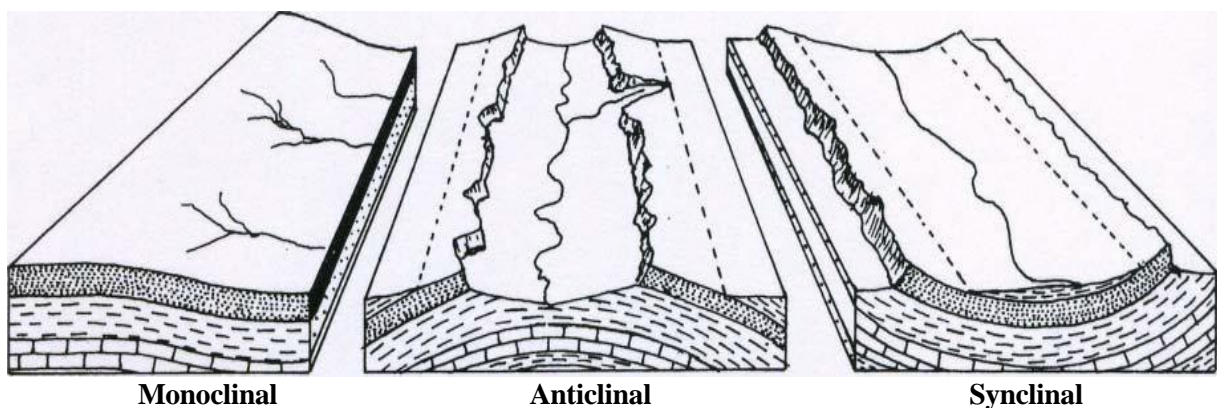
Monoclinal, Anticlinal ou Synclinal.

- **Synclinal**: Pli concave vers le haut, avec les flancs convergents vers l'axe.

Les couches sédimentaires les plus anciennes (a) sont à l'extérieur du pli.

- **Anticlinal**: Pli convexe vers le haut, avec les flancs divergents de l'axe. Les couches

sédimentaires les plus anciennes (a) sont à l'intérieur du pli.



✓ **Droit, déjeté ou couché**

Cette pénétration est déterminée par la position de son **plan axial**: vertical, oblique ou presque horizontal.

- **Plidroit ou symétrique**: surface axiale verticale.
- **Plidéjeté ou dissymétrique**: surface axiale inclinée dans le sens de la poussée orogénique, et pendage des flancs en sens opposé.
- **Plidéversé ou oblique**: surface axiale inclinée et pendage des flancs, tous trois dans le même sens. L'inclinaison du flanc le plus incliné ne dépasse pas 90°.
- **Plicouché**: surface axiale se rapprochant de l'horizontal.

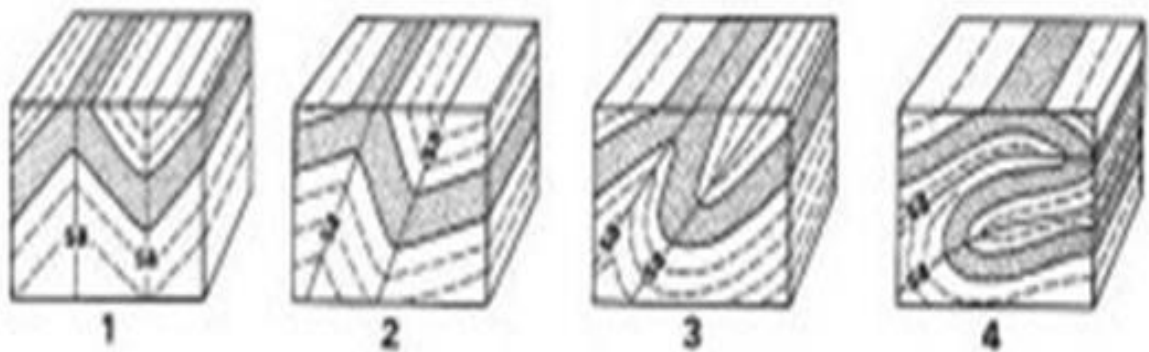


Fig.39: Différents types de plissement selon l'inclinaison des flancs et de la surface axiale (sa: surface axiale) : - 1 : plis droits - 2 : plis déjetés - 3 : plis déversés - 4 : plis couchés (extrait du « Dictionnaire de Géologie »)

Volcanologie

III.2.1. Les volcans

Introduction

Volcanologie : Ou vulcanologie est la science qui étudie le volcanisme : volcans, geysers, fumerolles, éruptions volcaniques, magmas, laves, tephres, etc.

- Un *volcanologue* ou *vulcanologue* est le scientifique spécialiste de cette discipline liée à la géodynamique et à la géomorphologie.

Le volcanologue observe et analyse les phénomènes magmatiques et les éruptions. Il améliore la compréhension de ce phénomène terrestre et contribue parfois à la prévention du danger (**Bardintzeff, 2017**).

Les objectifs de cette science sont de comprendre l'origine et le fonctionnement des volcans et des phénomènes assimilés afin d'établir un diagnostic (pour une période déterminée) sur les risques et les dangers encourus par les populations et les activités humaines.

Qu'est-ce qu'un volcan?

- Relief de forme conique, édifié par les laves et les projections issues de l'intérieur du globe, et qui a émis ou peut émettre des matières en fusion, par une cheminée et un cratère (LAROUSSE : <https://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/volcan/102153>).

- Le terme « **volcan** » tire son origine de Vulcano, une des îles Éoliennes nommée en l'honneur de Vulcain, le dieu romain du feu dont l'équivalent dans le panthéon grec est Héphestos.

- Un **volcan** est un relief terrestre, sous-marin ou extra-terrestre formé par l'éjection et l'empilement de matériaux issus de la montée d'un magma sous forme de lave et de téphras (éjectas ou pyro-clastes) tels que les cendres. Ce magma provient de la fusion partielle du manteau et exceptionnellement de la croûte terrestre. Selon la nature des matériaux, le type d'éruption et leur fréquence, les volcans prennent des formes variées mais en général ayant l'aspect d'une montagne conique, surmontée par un cratère ou une caldeira. Le lieu principal de sortie des matériaux lors d'une éruption se situe dans la plupart des cas au sommet du volcan, là où débouche la cheminée volcanique, mais il arrive que des ouvertures latérales apparaissent sur les flancs ou aux pieds du volcan.

Les structures de Volcan

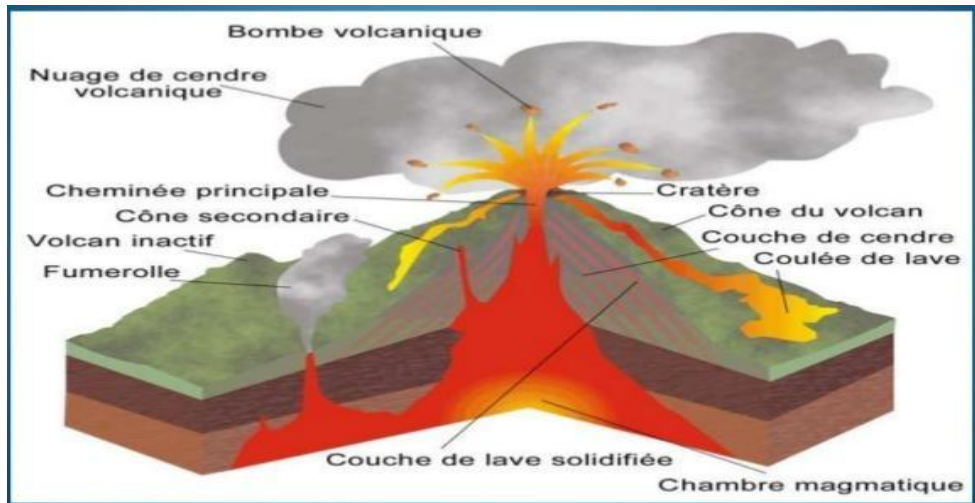


Fig.40: Schéma structural d'un volcan

(Source: Luigi Chiesa. Image: Spaccato vulcano.png .Wikimedia commons)

1. Une chambre magmatique alimentée par du magma venant du manteau et jouant le rôle de réservoir et de lieu de différenciation du magma. Lorsque celle-ci se vide à la suite d'une éruption, le volcan peut s'affaisser et donner naissance à une caldeira. Les chambres magmatiques se trouvent entre dix et cinquante kilomètres de profondeur dans la lithosphère.

2. Une cheminée principale qui est le lieu de transit privilégié du magma de la chambre magmatique vers la surface.

3. Un cratère sommital où débouche la cheminée principale.

4. Une ou plusieurs cheminées secondaires partant de la chambre magmatique ou de la cheminée principale et débouchant en général sur les flancs du volcan, parfois à sa base. Elles peuvent donner naissance à des petits cônes secondaires.

5. Des fissures latérales qui sont des fractures longitudinales dans le flanc du volcan provoquées par son gonflement ou son dégonflement. Elles peuvent permettre l'émission de lave sous la forme d'une éruption fissurale.

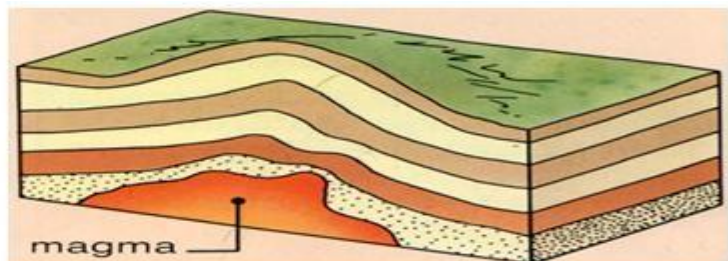
Comme les séismes, les volcans ne se répartissent pas de façon aléatoire à la surface de la planète. Plusieurs se situent aux frontières de plaques (volcanisme de dorsale et de zone de subduction), mais aussi à l'intérieur des plaques (volcanisme intraplaque, comme par exemple le volcanisme de point chaud).

Fonctionnement d'un volcan

- Réservoir de magma en profondeur;
- Une ou plusieurs cheminées faisant communiquer le réservoir et la surface;
- La montagne volcanique située à la surface, celle-ci pouvant être de formes diverses.

Comment se forme un volcan?

1- Le magma qui vient de la chambre magmatique est poussé vers le haut et pousse à son tour la roche qui se plie.



2 - La pression augmente petit à petit à cause du magma qui pousse sur les roches tout près. Le magma se dirige vers les zones de roches peu épaisses pour s'échapper par les cheminées. Une fois formé, ce volcan continuera d'entrer en éruption tant qu'il sera alimenté en magma.

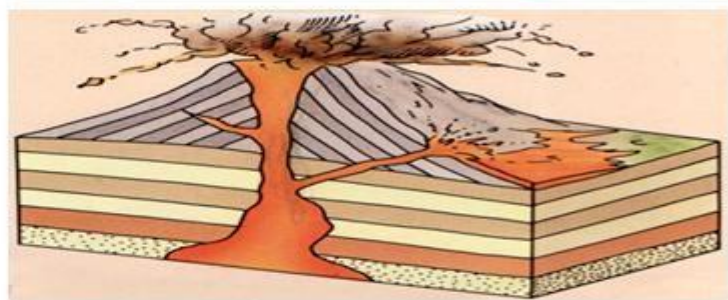


Fig.41: Formation d'un volcan

Matériaux rejetés par les volcans

➤ *Liquides:*

- Les laves :

- Fluides: pauvres en silices'écoulent rapidement et sont pauvres en gaz
- Visqueuses: riches en silices s'écoulent lentement et emprisonnent du gaz.
- Solides (tephras) qui vont constituer le cône volcanique. Des plus gros aux plus petits.
 - Blocs: Anguleux et solides
 - Bombes, -Scories, -Lapillis, - Cendres.
- Gaz
 - Durant l'éruption des gaz s'échappent principalement par le cône.
 - Durant la période d'accalmie des dégagements gazeux sortent par des fumerolles

Classification des volcans

Selon le type d'éruption, on distingue deux grands types de volcans:

A- Les «**volcans rouges**» aux éruptions effusives relativement calmes et émettant des laves fluides sous la forme de coulées. Ce sont les volcans de « point chaud », et les volcans d'« accréation » principalement représentés par les volcans sous-marins des dorsales océaniques . Deux sous types : 1 -Hawaïen, 2 -Strombolien

B -Les « **volcans gris** » aux éruptions explosives et émettant des laves pâteuses et des cendres sous la forme de nuées ardentes ou coulées pyroclastiques et de panaches volcaniques. Ils sont principalement associés au phénomène de subduction comme les volcans de la « ceinture de feu du Pacifique ». Quatre sous types: 1- Vulcanienne, 2 - Péléen, 3 -Plinienne, 4 -Surtseyenne.

La prévention des risques volcaniques

Les éruptions volcaniques correspondent à une **activité intense** de notre planète. Les éruptions peuvent parfois être produites par **un séisme** ou bien par un **raz de marée**. Si les volcans se trouvent vers des habitations, l'éruption peut les détruire (comme **Pompei** ville détruite par le Vésuve) et faire de nombreuses victimes.

Pour éviter ces catastrophes, il suffit d'utiliser des techniques mises au point par des scientifiques:

- Un **sismographe**: Il détecte les secousses du sol. Quand le magma remonte le long des cheminées volcaniques, il fait vibrer le sol.
- Un **inclinomètre**: Il mesure les pentes du volcan. En effet, le volcan peut se déformer et "gonfler" sous la pression des gaz.
- Des **satellites**: Ils mesurent les variations de température du sol.

- Des **mesures chimiques des gaz** rejetés par les volcans. Quand ils se modifient, l'éruption n'est pas loin.

Origines du volcanisme

✓ Le volcanisme est lié aux mouvements des plaques tectoniques c'est pourquoi on retrouve souvent des volcans à la jointure de deux plaques

✓ C'est quoi les plaques tectoniques. "L'écorce terrestre est divisée en gros morceaux, les plaques, qui s'emboîtent les unes dans les autres comme un gigantesque puzzle. Elles bougent tout le temps, s'écartent, se rapprochent, se cognent et glissent l'une sous l'autre.

✓ Les volcans se forment surtout en bordure de ces plaques parce que c'est à cet endroit qu'il est le plus facile pour le magma de s'échapper.

○ Là où les plaques s'écartent on parle de volcanisme de divergence. Les volcans y sont plutôt calmes avec des laves fluides et sont appelés volcans effusifs. Ce volcanisme à la frontière de plaques qui s'éloignent se retrouve au fond des océans sur les dorsales océaniques ou sur les continents avec les rifts continentaux.

○ Là où les plaques se chevauchent on parle de volcanisme de subduction. Les volcans y sont explosifs et dangereux.

✓ Les volcans se forment parfois en dehors de ces limites de plaques tectoniques à des endroits où le magma en fusion remonte des profondeurs en perçant. On parle alors de volcanisme de point chaud.

Répartition des volcans

Les volcans ne sont pas répartis au hasard sur la Terre.

A. Les volcans continentaux:

La majorité des volcans endormis se trouvent en Europe (les volcans d'Auvergne en France par exemple !) et en Afrique. Des volcans "actifs" se situent en Asie de l'est quelques-uns en Asie centrale. Nous en trouvons aussi en Amérique (nord et sud). Ces volcans sont alignés. De nombreux volcans sont installés tout autour du Pacifique: c'est la Ceinture de feu. Mais la plupart des volcans actifs se cachent au fond de l'océan ...

B. Les volcans sous-marins:

Au fond des océans, on trouve des dorsales océaniques. Ce sont des reliefs qui ressemblent à de longues chaînes de montagnes au milieu des océans. La majorité des volcans de la planète se trouvent là et ils sont très actifs. Le mélange noir et brûlant qui s'échappe de la cheminée a donné le nom de ces volcans particuliers : les fumeurs noirs.

Quelques exemples de volcans: _ Kilimandjaro (Kenya), Kilauea (Hawaï), Vésuve (Italie) et Batur (Indonésie)

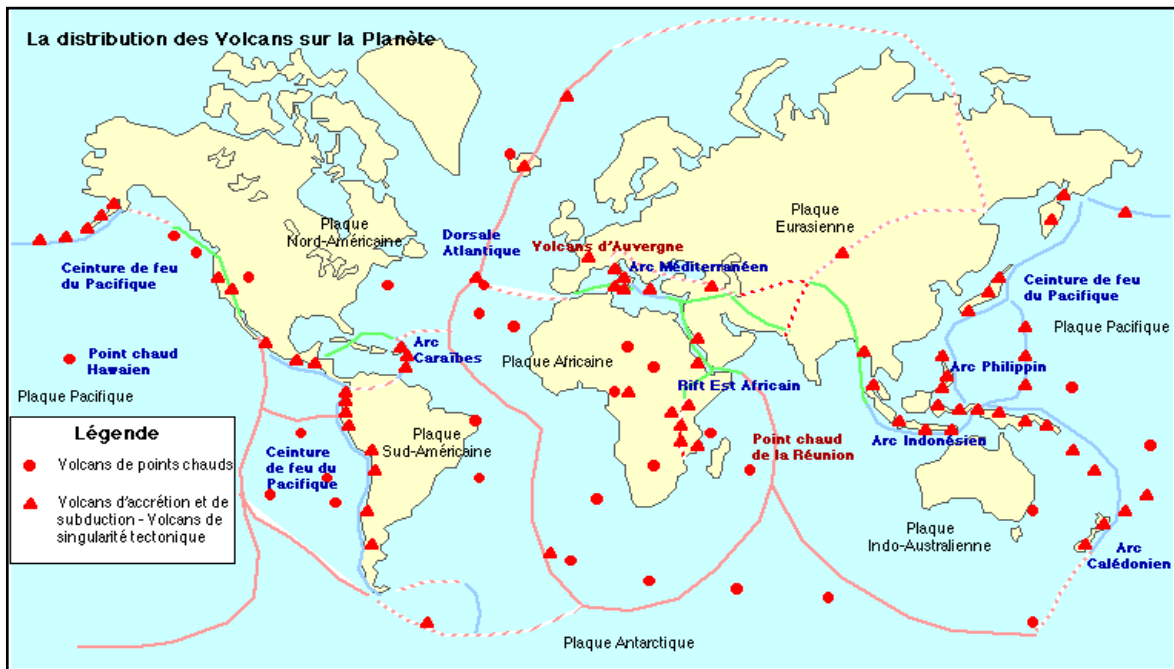


Fig.42: Distribution des volcans sur la planète
(<http://www.alicepeio.org/>)

ROCHES MAGMATIQUES

2. Les roches magmatiques

Introduction et caractères généraux des magmas III.2.2.1.1.

Définitions

- Les **roches magmatiques** à une température relativement élevée (650 à 1250° C), ces roches sont aussi appelées **roches ignées** (ou **roche de feu**). résultent de la *solidification* (*crystallisation, refroidissement*) d'un **magma**. Comme le magma en général

- Le **magma** est un bain silicaté fondu, constitué d'une phase liquide, d'une phase solide (cristaux) et d'une phase gazeuse.

- La *solidification du magma* peut se faire à l'intérieur de la lithosphère où le *refroidissement est lent*, et les roches formées sont alors appelées **roches plutoniques** (dites aussi **intrusives**). Elles n'apparaissent donc à la surface que par le jeu des déformations de l'écorce terrestre et de l'érosion.

- Le *magma peut aussi subir un refroidissement rapide* s'il est émis à la surface de la Terre, à l'air libre ou sous l'eau : les roches ainsi formées sont appelées **roches volcaniques** (dites aussi **extrusives** ou **effusives**).

- Entre les deux extrêmes, il existe des **intermédiaires**, et les roches formées sont nommées selon le contexte, roche de semi-profondeur, roches **périplutoniques**, roches **hypovolcaniques** (Chabou, 2017).

Caractères généraux des magmas

a. Types de magma : Les types de magmas sont déterminés par leurs compositions chimiques, et plus spécialement par leur teneur en silice. Ainsi, on distingue trois grands types de magmas :

1- Les **magmas basaltiques** ou **gabbroïques (basiques)** : 45-55 % SiO₂, riche en Fe, Mg, Ca, pauvre en K, Na.

2- Les **magmas andésitiques** ou **dioritiques (intermédiaires)** : 55-65% SiO₂, intermédiaire en Fe, Mg, Ca, K, Na.

3 Les **magmas rhyolitiques** ou **granitiques (acides)** : 65-75% SiO₂, pauvre en Fe, Mg, Ca, riche en K, Na.

Environ 80% des magmas émis par des volcans sont basaltiques, et les magmas andésitiques et rhyolitiques représentent ~10% chacun du total.

b. Gaz : La plupart des magmas contiennent des gaz (0,2 à 4% en poids) dissous

dans le liquide. Bien qu'ils soient présents en faible quantité, les gaz ont un effet énorme sur les propriétés physiques du magma. La composition des gaz dans les magmas est la suivante :

- Principalement H₂O (vapeur d'eau) avec un peu de CO₂ (dioxyde de carbone). A eux deux, ils comptent pour plus de 98% de tous les gaz émis par les volcans.
- Les autres gaz incluent N, Cl, S et Ar sont rarement présents à plus de 1%.

La présence de gaz dans les magmas est liée à leurs compositions chimiques. Ainsi, les magmas rhyolitiques ont une teneur en gaz dissous plus élevée que les magmas basaltiques.

c. Température des magmas: La température d'un magma est difficile à mesurer parce que les volcans actifs sont évidemment des endroits dangereux. (Les géologues emploient donc des appareils optiques pour mesurer la température d'un magma loin d'une éruption ou ils font des expériences en laboratoires pour déterminer les températures des roches en fusion).

- Magma basaltique: 1000–1200°C.
- Magma andésitique: 800–1000°C.
- Magma rhyolitique: 650–800°C.

d. Viscosité des magmas : La viscosité est la résistance du magma à l'écoulement (plus un magma est visqueux, et moins il se comporte comme un fluide). La viscosité dynamique mesure la résistance à l'écoulement d'un fluide. Elle dépend de plusieurs facteurs : la teneur en silice, la température, la composition, les gaz dissous et les bulles, les cristaux éventuels (Dominique, 2014).

Les **magmas riches en SiO₂** (silice) ont **une viscosité plus élevée** que ceux pauvres en SiO₂ (la viscosité augmente avec l'augmentation de la teneur en SiO₂ du magma).

Les **magmas de faible température** ont **une viscosité plus élevée** que les magmas de haute température (la viscosité d'un magma diminue rapidement quand la température augmente).

La viscosité est une propriété très importante qui détermine le caractère éruptif des magmas.

Remontées magmatiques:

Lors de la remontée de la roche liquide vers la surface, le magma se refroidit et peut cristalliser sans émerger pour former une roche plutonique dans des réservoirs (chambre magmatique, pluton), ou des dykes lorsqu'il reste confiné dans des fissures discordantes ou encore des sills lorsque le magma s'insère dans une fissure en

concordance avec les structures encaissantes. Si le magma atteint la surface, il jaillit par les cratères des volcans sous forme de lave dont la composition dictera le caractère plus ou moins fluide ou visqueux.

Un **dyke** ou **dike** : Le terme provient de l'anglais *dyke* (à rapprocher du néerlandais *dijk*, qui a donné le mot français « digue »), est un filon de roche magmatique qui s'est infiltré dans une fissure de l'encaissant. De ce fait, un dyke recoupe les autres roches qu'il traverse (à la différence d'un sill). Le dyke est un phénomène intrusif dans une fissure d'ouverture transversale. Selon les principes de la stratigraphie, son âge est donc toujours plus jeune que celui des roches encaissantes.

Un **sill** (ou couche filon) est une couche de roche magmatique souvent horizontale qui s'est infiltrée entre des couches plus anciennes de roche sédimentaire, de roche volcanique ou le long de la foliation d'une roche métamorphique.

Caractères d'un magma

- Composition essentiellement silicates;
- Température élevée de (1200°C à 1500°C);
- Viscosité qui lui confère une plus ou moins grande aptitude à couler ;
- Acidité et Basicité (**Dercourt et al., 2002**).

Caractéristiques minéralogiques

L'acidité ou la basicité d'un magma dépend de sa teneur en silice (SiO₂):

- Riche en silice (plus de 66%) le magma est acide, et sa viscosité est élevée;
- Pauvre en silice (moins de 52%) le magma est basique, et sa viscosité est faible;
- Si le magma contient moins de 45% de silice, il est alors dit **ultrabasique**.

Les grands types de magma

Il existe, grossièrement deux grands types de magma: granitique et basaltique.

1. Un **magma granitique** est un magma formé par la fusion de roches riches en silice, il est épais et visqueux.

2. Un **magma basaltique**, moins riche en silice, sera lui beaucoup plus fluide.

- Quand un magma granitique remonte vers la surface il se solidifie généralement en profondeur car la température devient vite insuffisante pour le maintenir à l'état liquide. C'est pourquoi les granites se forment exclusivement en profondeur.

- La température de solidification d'un magma basaltique étant beaucoup plus forte que celle des magmas granitiques (1200°C en surface contre 900°C), les magmas basaltiques arrivent le plus souvent à l'état liquide en surface. Ils donnent alors des éruptions. C'est un magma de ce type que l'on rencontre dans les volcans.

Les roches magmatiques

Définition

- Les roches **magmatiques** résultent de la solidification (cristallisation, refroidissement) d'un **magma**.

- Les *roches magmatiques* sont des roches **endogènes**, c'est-à-dire ayant pris naissance à l'intérieur de la Terre (**Bougeois, 2014**).

- Les *roches magmatiques* (roches **ignées** = roches **éruptives** ou **roche de feu**), se forment quand un magma se refroidit et se solidifie, avec ou sans cristallisation complète des minéraux le composant. Cette solidification peut se produire :

- En profondeur, cas des **roches magmatiques plutoniques (intrusives)**;
- À la surface, cas des **roches magmatiques volcaniques (extrusives ou « effusives »)**.

Composition chimique

La composition chimique des roches magmatiques varie dans des limites assez étroites, différentes de celles des roches sédimentaires qui proviennent essentiellement de leur transformation à la surface du globe. Les *données géochimiques* montrent que **O** et **Si** sont largement dominants, suivis par Al, puis par Fe, Mg, Ca, Na, K, etc.

La **silice** joue donc un rôle prédominant. Cela correspond aux deux types de roches magmatiques ayant la plus large répartition, les **basaltes** et les **granites**, qui sont respectivement les plus représentatifs des roches volcaniques et plutoniques.

Composition minéralogique

La composition minéralogique d'une roche magmatique est fonction de la composition chimique du magma et de ses conditions de cristallisation. Elle s'exprime quantitativement par le pourcentage (ordinairement en volume) des différents minéraux réellement observés dans la roche : c'est la **composition modale** ou **mode**, évidemment différente de la composition normative (minéraux virtuels). La *composition modale* est déterminée par l'*analyse macroscopique et microscopique des roches*. Bien qu'il existe plus de mille espèces minéralogiques, les minéraux qui constituent plus de 99 % des roches magmatiques appartiennent à 8 groupes de minéraux (principalement des **silicates** et **d'alumino-silicates**) : Quartz, feldspaths, feldspathoïdes, olivines, pyroxènes, amphiboles, biotites (micas), oxydes de fer et de titane.

Les propriétés des roches magmatiques

a- Elles sont des roches cristallines (structure cristalline) on peut voir les cristaux à l'œil nu.

b- Elles ne sont pas disposées en couches (ne sont pas stratifiées), Elles sont par contre, en massif homogène.

c- Elles ne contiennent pas de fossiles (ne sont pas fossilifères).

d- Elles ont une texture **équante** – C'est-à-dire elles conservent la même composition dans toutes les directions de l'espace.

Classification des roches magmatiques

Les roches magmatiques sont classées en fonction de composition chimique, le mode de gisements et de leur mode de mise en place (mode de formation), de leur texture pétrographique, de leur bien sûr selon les minéraux présents, que ce soit sous la forme de cristaux ou de verre amorphe:

➤ **A• Selon le mode de mise en place (leur mode de formation) (Milnithouk V.S., et al 1989).**

1- Les roches volcaniques (ou effusives) se sont formées très rapidement à la surface de Terre. Elles ont une structure vitreuse ou microcristalline (petits cristaux).

2 - Les roches plutoniques (ou "roches de profondeur") se sont formées en se refroidissant très lentement dans les profondeurs de la Terre. Elles ont une structure grenue avec des cristaux bien visibles.

3 - Les roches filoniennes (ou "roches de semi-profondeur") ont une structure intermédiaire, microgrenue. Les cristaux sont minuscules. Le temps de refroidissement de la roche dépend de la différence de température entre le magma et la roche environnante (dite roche encaissante). ces roches se sont formées lorsque le magma s'est figé en remontant dans des fissures sous forme de filons (d'où leur nom).

➤ **B• En fonction de la composition minéralogique (Critères minéralogiques):** On distingue parmi les minéraux « **cardinaux** » (= principaux): le quartz, les feldspaths alcalins (orthose), les plagioclases, les feldspathoïdes (néphéline) et les minéraux **colorés** (micas, amphiboles, pyroxènes, olivine).

➤ **C• Classification chimique [Selon la teneur en silice (SiO₂):**

- Les roches acides = sursaturées = hypersiliceuses: SiO₂ > 65%, cas des **granites**;
- Les roches intermédiaires = saturées: 65% > SiO₂ > 52%, cas des **andésites**;
- Les roches basiques = sous-saturées: 52% > SiO₂ > 45%, cas des **basaltes**;
- Les roches ultrabasiques = hyposiliceuses: SiO₂ < 45%, cas des **péridotites**

➤ **D• Selon la texture de la roche (Critères granulométriques)**

Texture: (lat. *textura*, *tissu*) = Disposition des parties d'un corps.

Textured'une roche:

En pétrographie, la **texture** d'une roche caractérise l'arrangement des cristaux entre eux.

La **texture** (on parle parfois de structure) d'une roche magmatique est le terme utilisé pour décrire les dimensions, la forme et l'arrangement entre minéraux dans les roches magmatiques. Les principales textures sont les suivantes :

✓ Texture **grenue (Holocristalline ou phanéritique)** : Concerne les roches magmatiques dont les minéraux sont visibles à l'œil nu (de grandes tailles). C'est le cas des roches plutoniques.

✓ Texture **microlithiques (Hypocristalline ou aphanitique)** : concerne les roches magmatiques qui ne montrent pas de cristaux visibles à l'œil nu. C'est le cas des roches volcaniques.

✓ Texture **vitreuse (Hyaline)** : concerne les roches magmatiques qui sont entièrement ou en grande partie constituées de verre. C'est le cas des roches magmatiques qui ont refroidi très rapidement (en général sous l'eau).

✓ Texture **porphyrique** : concerne les roches magmatiques qui possèdent de gros minéraux (phénocristaux) au milieu d'une texture aphanitique ou vitreuse. C'est le cas des roches magmatiques ayant subi deux temps de refroidissement (lent puis rapide).

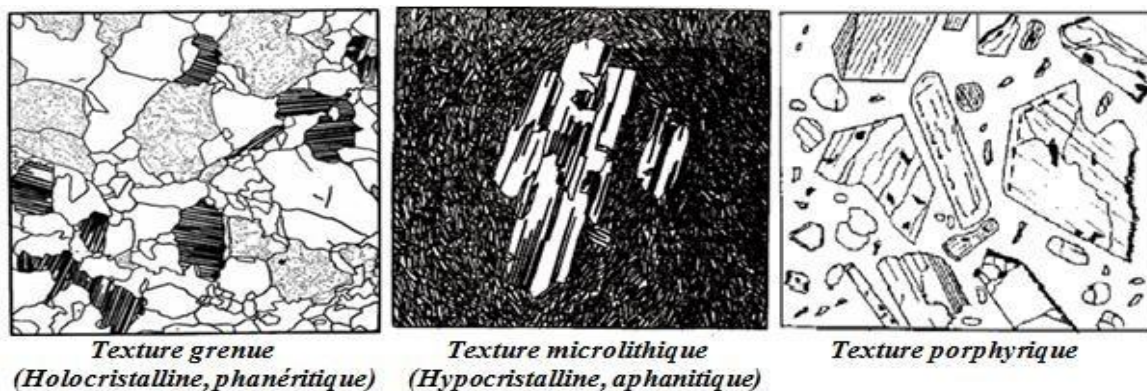


Fig.43: Différents types de texture des roches magmatiques

(Textures référant à la taille, la granulométrie, la dimension relative des cristaux et le degré de cristallisation)

Modes de mise en place des roches magmatiques

Les roches magmatiques peuvent se mettre en place dans deux environnements différents, en surface et en profondeur.

Les magma transitent depuis le manteau ou la croûte terrestre pour se solidifier en surface soit sous forme de **roches volcaniques**, soit en cristallisant à l'intérieur de la

lithosphère pour former des **roches plutoniques**. On parle également de roche ignée extrusive (volcanique) et de roche ignée intrusive (plutonique).

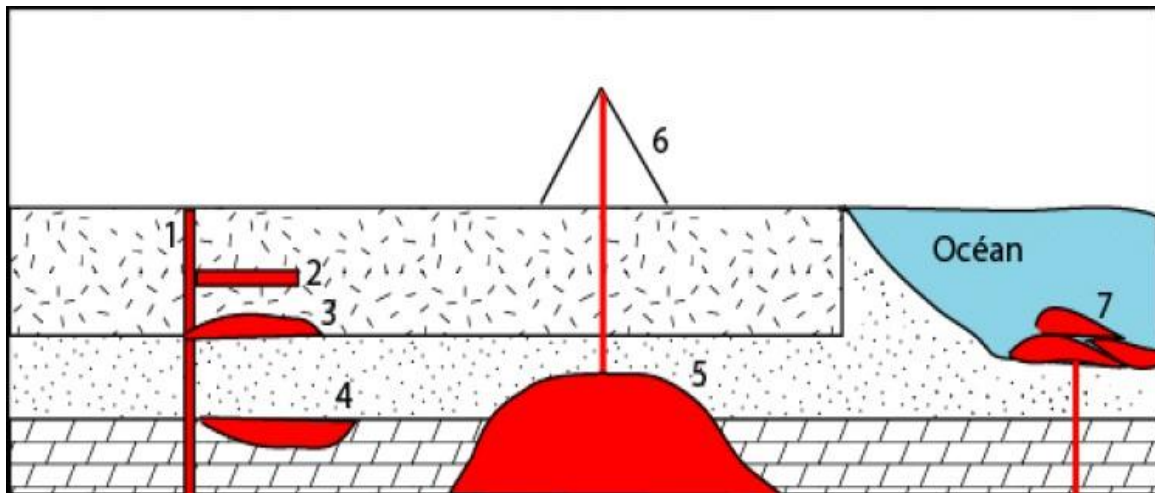


Fig.44: Principaux modes de mise en place des roches magmatiques
(Source: Chabou, 2017)

1 : Dyke: La roche magmatique recoupe les roches encaissantes.

2 : Sill: La roche magmatique est parallèle aux roches encaissantes (concordante).

3 : Laccolite : Structure de roche magmatique concordante à surface inférieure plane et surface supérieure convexe vers le haut.

4 : Lopolite: Structure de roche magmatique concordante en forme de cuvette plate.

5 : Batholite: Grand massif de roche magmatique qui recoupe l'encaissant.

6 : Volcan: Relief en forme généralement conique constitué par l'empilement de laves et/ou de projections ayant atteint la surface.

7 : Laves en coussins (Pillow-Lavas): Laves mises en place sous l'eau.

TECTONIQUE DES PLAQUES

Tectonique des plaques

Introduction

La théorie de *la tectonique des plaques* (apparue dans les années 60) regroupe deux notions fondamentales : ***la dérive des continents*** et ***l'expansion océanique***.

La dérive des continents: 1. Définition :

Est une **théorie** proposée au début du XIX^{ème} siècle par le physicien-météorologue **Alfred Wegener** (migration des continents), pour tenter d'expliquer, entre autres, la **similitude** dans le tracé des côtes de part et d'autre de l'Atlantique. (Se traduit par des déplacements de plaques lithosphériques).

2. Les arguments (preuves) de la dérive des continents sont:

- ✓ Le parallélisme des côtes (la similitude de la forme des rivages continentaux);
- ✓ La répartition de certains fossiles (les faunes et flores fossiles similaires avant le Mésozoïque sur des continents);
- ✓ Les traces d'anciennes glaciations [Il y a des sédiments carbonifères (glaciaires et houillers) retrouvés actuellement sur des continents dont la position est incohérente avec les environnements associés;
- ✓ La correspondance des structures géologiques (**Bourque, 2004**).

C'est-à-dire, il y a des **arguments** :

Paléoclimatique: Traces de glace permo-carbonifère dans l'hémisphère sud → sens d'écoulement de la glace, qui provient des bassins des océans indiens et pacifique → continents de l'hémisphère sud = Gondwana.

Paléontologique: Fossiles de plantes et animaux en Amérique du Sud et Afrique, besoin d'eau douce → Pangée : Tous les continents étaient regroupés au Trias.

Géologique: Les roches ainsi que leurs âges sont similaires en A du Sud et en Afrique : Les côtes guinéennes et du Brésil s'assemblent parfaitement.

Géodésique: Les USA s'éloignent de l'Europe de 2.5 cm/an

Structuraux: Failles de mêmes sens et ensembles lithologiques de part et d'autre de l'Atlantique.

3. Les conditions de la dérive des continents sont :

- ✓ L'existence d'une **lithosphère rigide** reposant sur l'**asthénosphère ductile** permettant le découplage mécanique avec le manteau profond.

✓ La lithosphère est composée d'un **nombre fini de plaques** dont les limites (zones de subduction, failles transformantes et dorsales) correspondent à des zones sismiques.

✓ Les déplacements horizontaux des plaques sont dus à des **mouvements convectifs** dans le manteau.

4. Les grandes étapes de la dérive des continents sont:

✓ Vers la limite entre le Paléozoïque (**PZ**) et le Mésozoïque (**MZ**) [il y a environ 250Ma], on distingue une seule masse continentale, la **Pangée** entourée d'un océan, la **Panthalassa**.

✓ Puis cette masse continentale éclate pour former deux sous-ensembles, la **Laurasia** et le **Gondwana**, bordés à l'Ouest par un nouvel océan, la **Téthys**.

✓ Ces blocs continentaux continuent de se fragmenter (et éventuellement converger) pour donner progressivement naissance aux **plaques et océans actuels**.

L'expansion océanique (expansion des fonds océaniques):

Mécanisme d'ouverture des océans. La croûte océanique se forme sans cesse par apport de magma au niveau des dorsales et s'élargit symétriquement par rapport à celles-ci.

✓ **Une dorsale:** Zone où se crée la lithosphère, très large, très profonde [60 000 km de long] pour l'Atlantique]. Elle est composée d'un rift central (vallée limitée par des failles) et entourée de volcans (tremblements peu profonds). La profondeur de l'océan augmente depuis les dorsales -> bassins océaniques (6000m pour l'Atlantique) ;

✓ **L'expansion des océans :** Vastes mouvements de convection entraînant la lithosphère comme un tapis roulant des dorsales (fusion partielle) -> jusqu'à lieu de disparition. La plaque lithosphérique s'épaissit par refroidissement, provoquant une augmentation de sa densité ;

✓ **Nouvel océan:** Fissuration du continent en 2 plaques séparées par lithosphère océanique qui s'y infiltre.

Tectonique des plaques: « *Tout bouge en profondeur, tout change en surface* ».

Tectonique: Est cette partie de la géologie qui étudie la nature et les causes des déformations des ensembles rocheux, plus spécifiquement dans ce cas-ci, les déformations, à grande échelle, de la lithosphère terrestre.

Plaque: Est un volume rigide, peu épais par rapport à sa surface.

Tectonique des plaques: Est une théorie scientifique planétaire unificatrice qui

propose que les déformations de la lithosphère sont reliées aux forces internes de la terre et que ces déformations se traduisent par le découpage de la lithosphère en un certain nombre de **plaques rigides** (14) qui bougent les unes par rapport aux autres en glissant sur l'asthénosphère. Trois plaques seulement sont entièrement océaniques: la plaque Pacifique, Nazca et Cocos. Le mouvement des plaques s'effectue en réponse à la libération de la chaleur interne de la terre. En se dissipant, cette chaleur met en mouvement ses couches internes et externes. Cette chaleur provient de deux sources :

✓ La première source est héritée de l'époque de sa formation par accréation il y'a 4,55 milliards d'années ;

✓ La deuxième source provient de la désintégration des éléments radioactifs (U, Th, K). La chaleur se propage par différents mécanismes de conduction et de convection. Dans les couches solides, elle est transmise par conduction, alors que dans les masses liquides se développent des courants de convection. Ces courants seraient, dans la zone externe du noyau, responsables du champ magnétique terrestre, et dans le manteau, responsables des processus liés à la tectonique des plaques. Ces mouvements définissent trois types de frontières entre les plaques (**Bourque, 2004**).

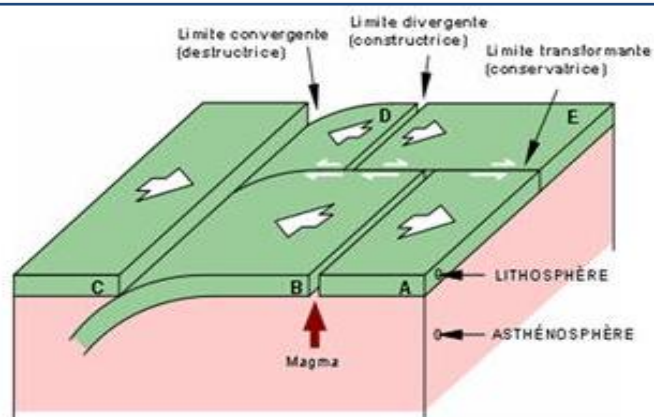
Les trois types de frontières

• **Les frontières divergentes**, là où les plaques s'éloignent les unes des autres et où il y a production de nouvelle croûte océanique; ici, entre les plaques A et B, et D et E;

• **Les frontières convergentes**, là où les plaques entrent en collision, conséquence de la divergence; ici, entre les plaques B et C, et D et C;

• **Les frontières transformantes**, lorsque les plaques glissent latéralement les unes contre les autres le long de failles; ce type de limites permet d'accomoder des différences de vitesses dans le déplacement de plaques les unes par rapport aux autres, comme ici entre A et E, et entre B et D, ou même des inversions du sens du déplacement, comme ici entre les plaques B et E

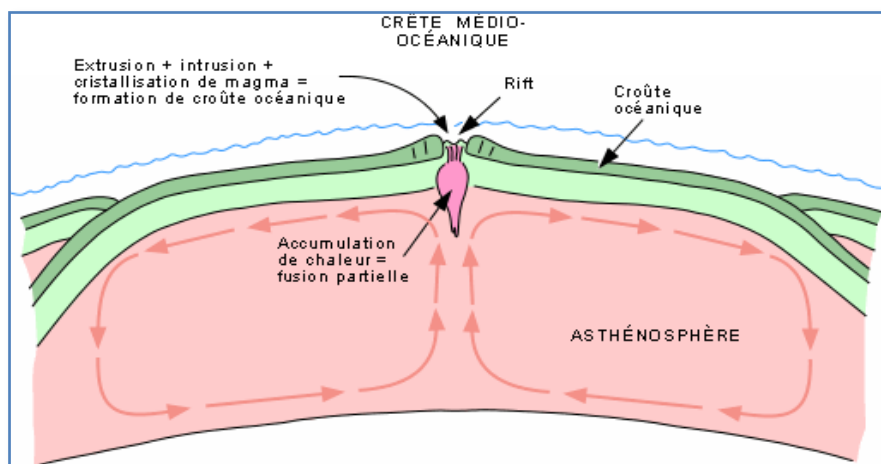
(Types de frontières entre les plaques).



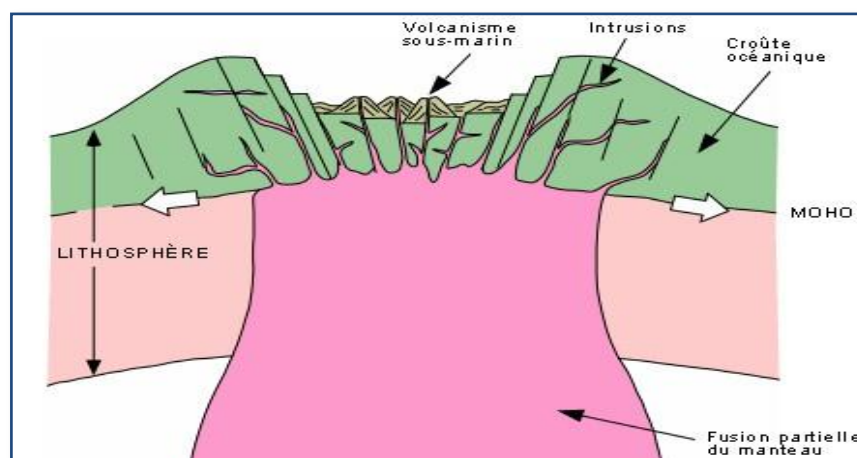
Le mouvement des plaques tectoniques est assuré par les grandes cellules de convection dans le manteau, qui sont le résultat du flux de chaleur qui va du centre vers l'extérieur de la terre.

Les frontières divergentes:

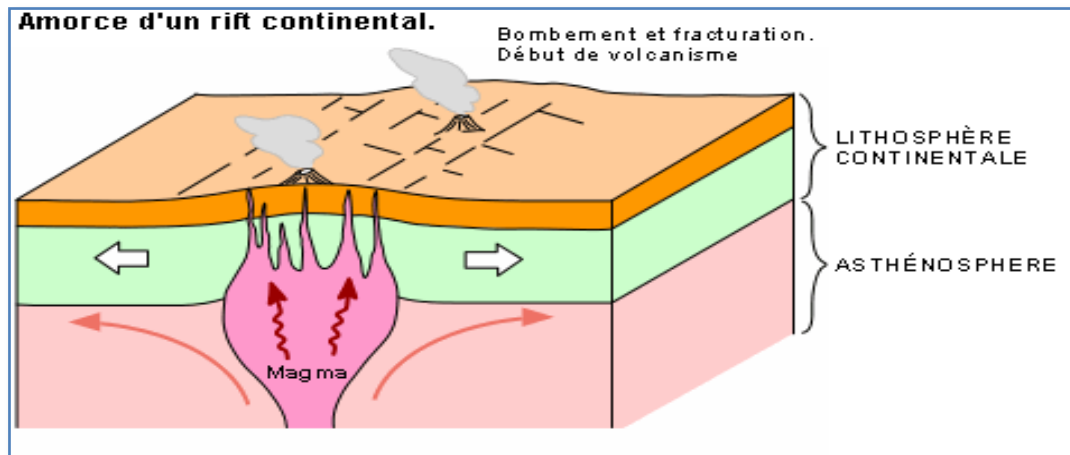
Unflux de chaleur qui va du centre vers l'extérieur de la terre, un flux causé par la désintégration radioactive de certains éléments chimiques dans le manteau et qui engendrent des cellules de convection dans le manteau plastique (asthénosphère). A cause de cette convection, il y a concentration de chaleur en une zone où le matériel chauffé se dilate, ce qui explique le soulèvement correspondant à la dorsale océanique. La concentration de chaleur conduit à une fusion partielle du manteau qui produit du magma. La convection produit, dans la partie rigide de l'enveloppe de la terre (lithosphère), des forces de tension qui font que deux plaques divergent; elle est le moteur du tapis roulant, entraînant la lithosphère océanique de part et d'autre de la dorsale. Entre ces deux plaques divergentes, la venue de magma crée de la nouvelle croûte océanique (**Bourque, 2004**).



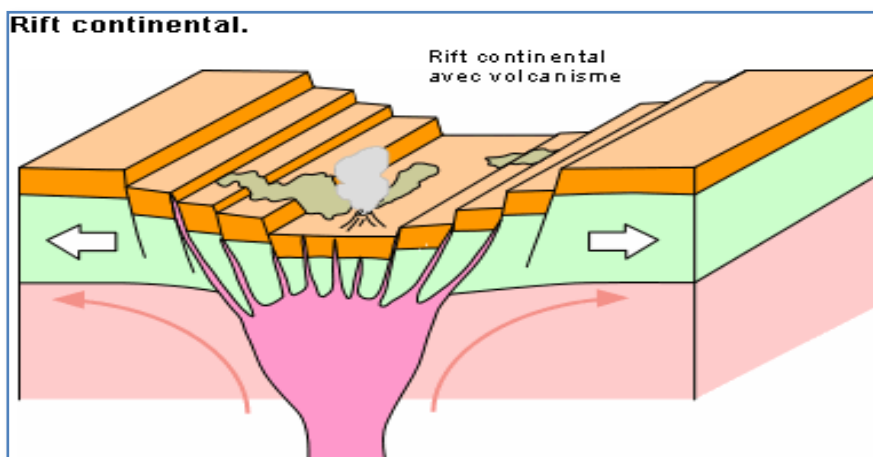
Les schémas suivants illustrent la zone de divergence:



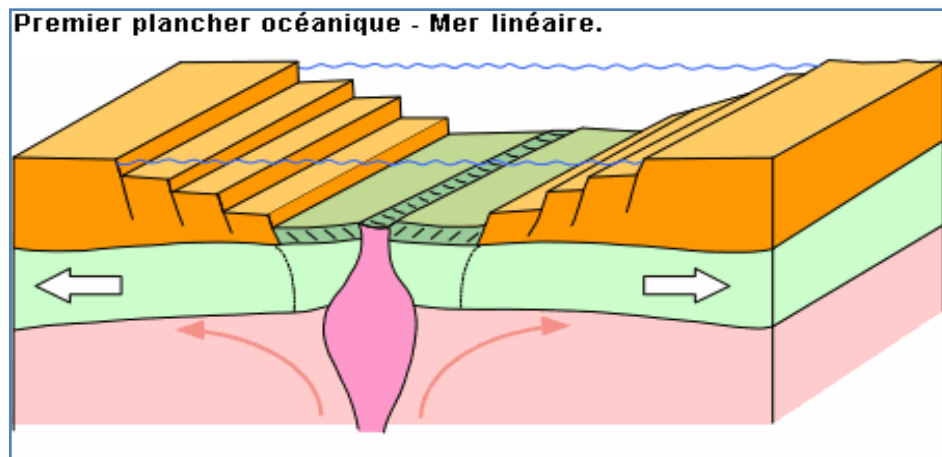
L'étalement des fonds océaniques crée dans la zone de dorsale, des tensions qui se traduisent par des failles d'effondrement et des fractures ouvertes, ce qui forme au milieu de la dorsale, un fossé d'effondrement qu'on appelle un rift océanique. Le magma produit par la fusion partielle du manteau s'introduit dans les failles et les fractures du rift. Une partie de ce magma cristallise dans la lithosphère, alors qu'une autre est expulsée sur le fond océanique sous forme de lave et forme des volcans sous-marins.



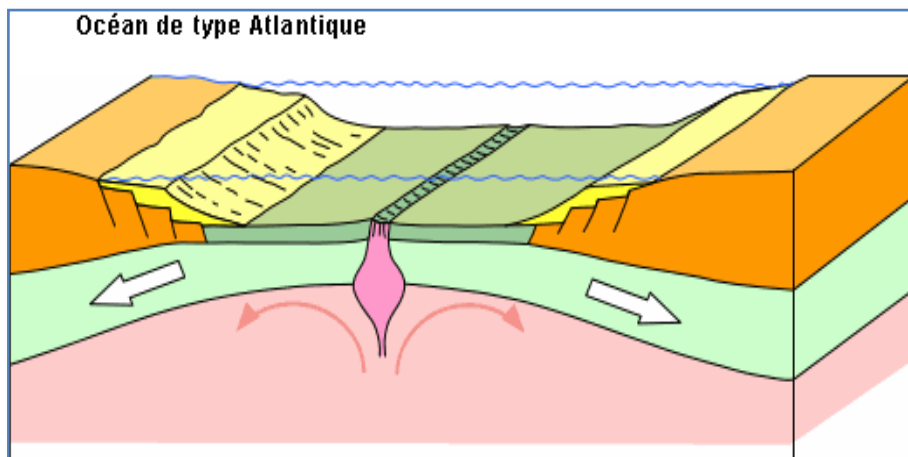
L'accumulation de chaleur sous une plaque continentale cause une dilatation de la matière qui conduit à un bombement de la lithosphère. Il s'ensuit des forces de tension qui fracturent la lithosphère et amorcent le mouvement de divergence conduit par l'action combinée de la convection mantellique et la gravité. Le magma viendra s'infiltrer dans les fissures, ce qui causera par endroits du volcanisme continental; les laves formeront des volcans ou s'écouleront le long des fissures.



La poursuite des tensions produit un étirement de la lithosphère; il y aura alors effondrement en escalier, ce qui produit une vallée appelée un rift continental.



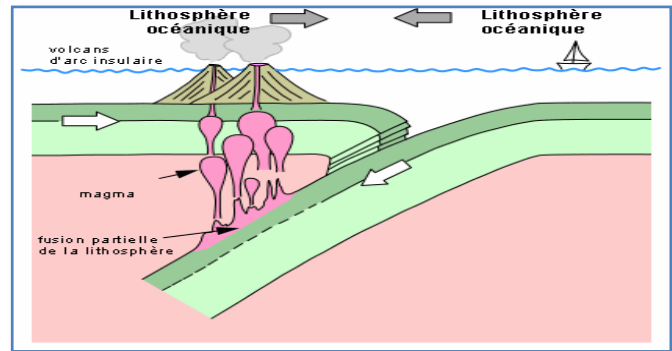
Deux morceaux de lithosphère continentales se séparent et s'éloignent progressivement l'un de l'autre.



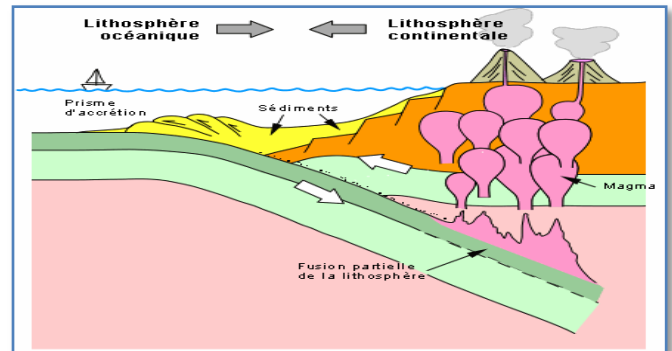
Les frontières convergentes:

La surface de la terre est un espace fini, le fait que les **plaques** grandissent aux frontières divergentes implique qu'il faudra détruire de la lithosphère ailleurs pour maintenir constante la surface terrestre. Cette destruction se fait aux frontières convergentes qui, comme le nom l'indique, marquent le contact entre deux **plaques** lithosphériques qui convergent l'une vers l'autre. La destruction de plaque se fait par l'enfoncement dans l'asthénosphère d'une plaque sous l'autre plaque, et par la digestion de la portion de plaque enfoncée dans l'asthénosphère (Bourque, 2004).

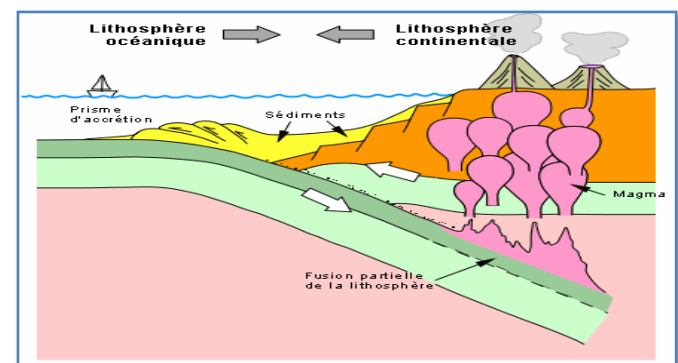
a. Un **premier type de collision** résulte de la convergence entre deux **plaques** océaniques. Dans ce genre de collision, une des deux **plaques** (la plus dense, généralement la plus vieille) s'enfonce sous l'autre pour former une zone de subduction.



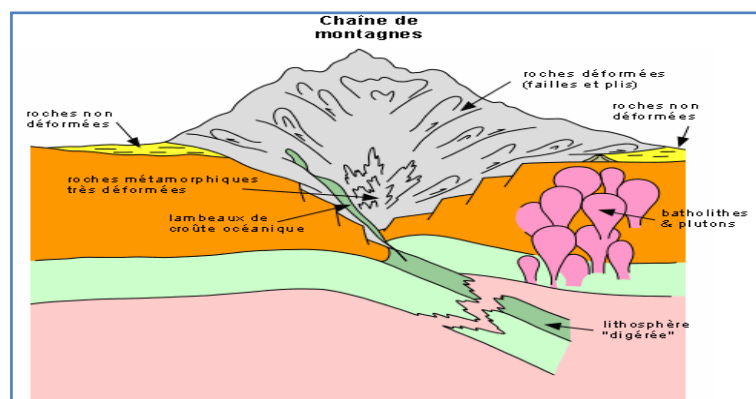
b. Un **second type de collision** est le résultat de la convergence entre une plaque océanique et une plaque continentale. Dans ce type de collision, la plaque océanique plus dense s'enfonce sous la plaque continentale.



c. Un **premier type de collision** résulte de la convergence entre deux **plaques** océaniques. Dans ce genre de collision, une des deux **plaques** (la plus dense, généralement la plus vieille) s'enfonce sous l'autre pour former une zone de subduction.



Lorsque les deux **plaques** entrent en collision, le mécanisme se coince : le moteur du déplacement (la convection dans le manteau supérieur et la gravité) n'est pas assez fort pour enfoncer une des deux **plaques** dans l'asthénosphère à cause de la trop faible densité de la lithosphère continentale par rapport à celle de l'asthénosphère.



Tout le matériel sédimentaire est comprimé et soulevé pour former une chaîne de

montagnes où les roches sont plissées et faillées. Des lambeaux de la croûte océanique peuvent même être coïncés dans des failles. C'est la soudure entre deux **plaques** continentales pour n'en former qu'une seule.

Toutes les grandes chaînes de montagnes plissées ont été formées par ce mécanisme. Un bon exemple récent de cette situation, c'est la soudure de l'Inde au continent asiatique, il y a à peine quelques millions d'années, avec la formation de l'Himalaya

les frontières transformantes

Les frontières transformantes correspondent à de grandes fractures qui affectent toute l'épaisseur de la lithosphère; on utilise plus souvent le terme de failles transformantes. Elles se trouvent le plus souvent, mais pas exclusivement, dans la lithosphère océanique. Ces failles permettent d'accommoder des différences dans les vitesses de déplacement ou même des mouvements opposés entre les **plaques**, ou de faire le relais entre des limites divergentes et convergentes (**Bourque, 2004**).

III.3.2.2.A quel rythme se font ces mouvements de divergence et de convergence? Les taux de divergence et de convergence ne sont pas identiques partout. La divergence varie de 1,8 à 4,1 cm/an dans l'Atlantique et de 7,7 à plus de 18 cm/an dans le Pacifique. La convergence se fait à raison de 3,7 à 5,5 cm/an dans le Pacifique. À noter le taux de déplacement latéral relatif le long de la faille de San Andreas en Californie (~ 5,5 cm/an).

Déplacements des plaques sur la sphère

En fait les choses sont un peu plus compliquées que cela: tout déplacement sur la surface d'une sphère (ici la Terre) est assimilable à une rotation autour d'un axe vertical passant par un point situé quelque part sur la surface de cette même sphère. La vitesse V de n'importe quel point sur une plaque donnée dépend donc simplement de sa distance R par rapport au pôle de rotation de la plaque, et de la vitesse de rotation de cette plaque autour de ce pôle de rotation. Le tableau suivant donne les positions des pôles de rotation, ainsi que les vitesses de rotation autour de ces pôles en degrés par million d'années, déterminés pour les 12 grandes **plaques**

Déplacements des 12 plaques

Ces plaques se déplacent, entraînées par la convection dans le manteau. Les vitesses de ces déplacements vont de presque rien à plusieurs centimètres par an, jusqu'à

Comme tout bouge à la surface de la Terre, il est nécessaire de dire par rapport à quoi exactement on définit un mouvement donné. On a constaté qu'un certain nombre de volcans (en général marins, les fameux points chauds !) ne bougeaient que très faiblement les uns par rapport aux autres : en gros, ils sont stables et les plaques « défilent » par-dessus.

Sismicité tectonique des plaques

A cause de leurs mouvements, les plaques se « frottent » les unes aux autres ou « tamponnent » les unes contre les autres. Les « chocs » des plaques les unes contre les autres sont l'origine des tremblements de Terre (ou séismes). Une des conséquences très importante de ce qui précède est que ces séismes ne se produisent pas n'importe où mais uniquement *le long des frontières entre les plaques*.

Subduction et Dorsale

A. Subduction:

Lorsque deux plaques convergent, l'une s'enfonce sous l'autre, dans le manteau : c'est la subduction. Ce phénomène engendre séismes, volcanismes, et formation de chaînes de montagnes. Ce terme a été inventé par A. Amstrutz en 1951 pour les Alpes. Il désigne le processus au cours duquel une lithosphère s'enfonce sous une autre (à son époque, la théorie de la tectonique des plaques n'était pas encore élaborée). On appelle aussi les zones de **subduction** : *marges convergentes* ou *marges actives*.

B. Dorsale:

Les dorsales (médio-)océaniques, appelées également rides (médio-)océaniques forment des reliefs allongés au fond des océans. Grandes de 1000 à 2000 km, elles sont longues de plus de 6000 km et hautes de plus de 2000 m par rapport au plancher océanique. En certains points, le sommet peut atteindre la surface (Islande, Açores...). Au niveau des dorsales, la croûte océanique se forme sans cesse par apport de magma. L'axe des dorsales est souvent marqué par une zone plus basse, c'est le rift, à ne pas confondre avec le premier stade de l'extension continentale aussi appelé rift.

Les principales plaques lithosphériques, leurs vitesses de déplacement et leurs frontières.

Il y a en gros 12 grandes plaques tectoniques à la surface de la Terre (par ordre de taille):

Tab.9: Vitesses de déplacement des 12 grandes plaques tectoniques

1	PACIFIQUE	10cm/an vers le Nord-Ouest
----------	-----------	----------------------------

2	EURASIE	1cm/an vers l'Est
3	AFRIQUE	2cm/an vers le Nord
4	ANTARCTIQUE	Tourne sur elle-même
5	INDE-AUSTRALIE	7cm/an vers le Nord
6	AMERIQUE DU NORD	1cm/an vers l'Ouest
7	AMERIQUE DU SUD	1cm/an vers le Nord
8	NAZCA	7cm/an vers l'Est
9	PHILIPPINE	8cm/an vers l'Ouest
10	ARABIE	3cm/an vers le Nord-Est
11	COCO	5cm/an vers le Nord-Est
12	CARAIBE	1cm/an vers le Nord-Est

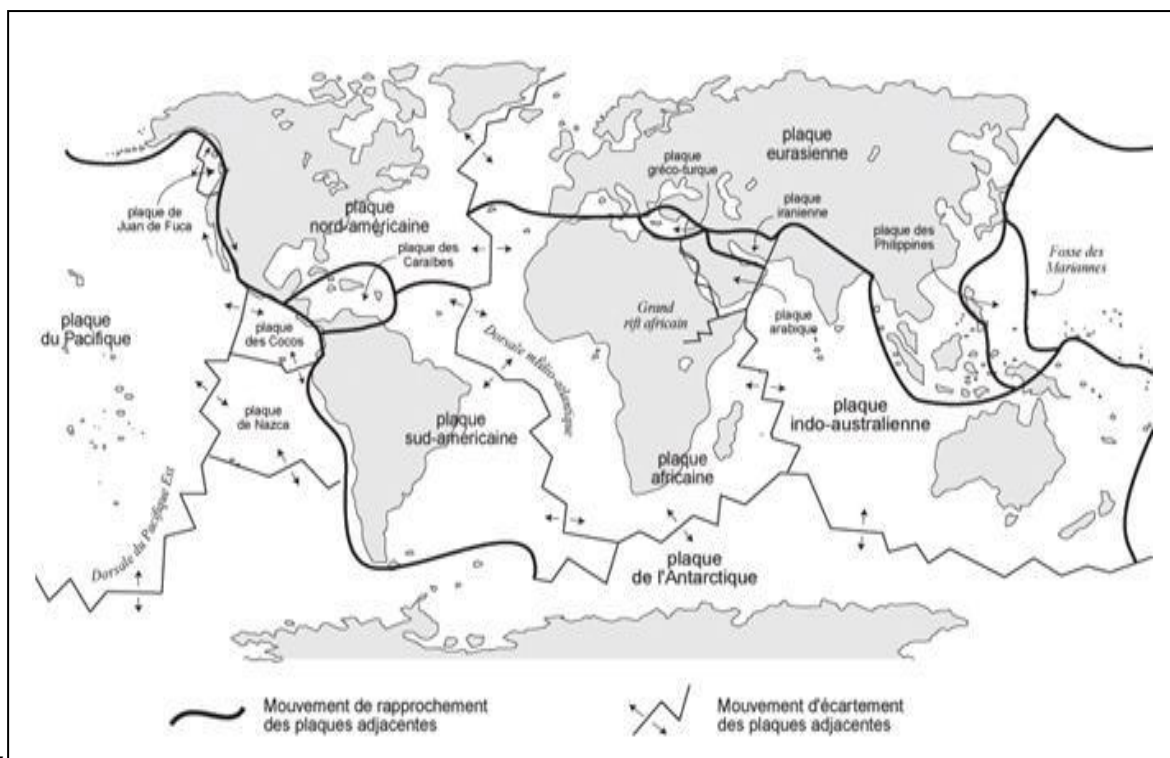
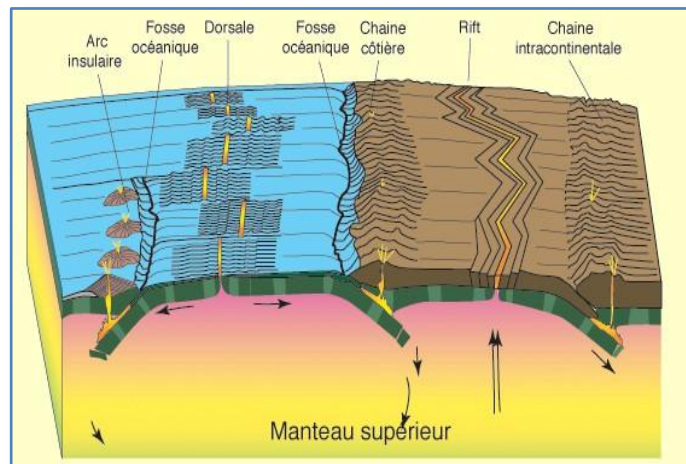


Fig. (Source: Dictionnaire d'histoire et de philosophie des sciences, 1999)

La Terre est un système où toutes les pièces, tous les éléments, forment une grande machine mue par la thermodynamique.

Le moteur est constitué par l'action combinée de la gravité terrestre et des grandes cellules de convection dans le manteau résultant du flux de chaleur qui va du centre vers l'extérieur de la terre, un flux de chaleur qui est relié à la décomposition des éléments radioactifs contenus dans les minéraux constitutifs du manteau. Ces cellules concentrent de la chaleur dans leur partie ascendante, ce qui cause une fusion partielle du manteau tout à fait supérieur et une expansion des matériaux. C'est cette expansion qui produit une dorsale médio-océanique linéaire.

L'écoulement de l'asthénosphère sous la lithosphère rigide entraîne cette dernière; il en découle des tensions au niveau de la dorsale, causant la divergence et le magmatisme associé.



Ainsi, il y a formation continue de nouvelle lithosphère océanique au niveau de la dorsale et élargissement progressif de l'océan. En contrepartie, puisque le globe terrestre n'est pas en expansion, il faut détruire de la lithosphère, ce qui se fait par enfouissement de lithosphère océanique dans les zones de subduction qui correspondent aux fosses océaniques profondes pouvant atteindre les 11 km (fosse des Mariannes). Les dorsales sont disséquées par des failles dites transformantes pour accommoder des différences de vitesses de divergence.

A noter que l'iconographie de la *tectonique des plaques* présente toujours les dorsales comme des droites sur un plan. En fait, il faut bien comprendre que, la terre étant une sphère, le parcours de la dorsale est linéaire sur la surface de cette sphère. On représente aussi les cellules de convection en deux dimensions; il faut faire un effort d'abstraction pour se les représenter en trois dimensions, à l'intérieur de la sphère (Bourque, 2004).

TRAVAUX PRATIQUES



TRAVAUX PRATIQUES

I. Topographie

Introduction

La **cartographie** est à la fois la science, la technique et l'art de réaliser et d'utiliser les cartes. Un bon cartographe doit non seulement en maîtriser les aspects scientifiques et techniques mais doit également mettre en oeuvre des compétences artistiques dans le choix des traits, des couleurs et des écritures (**Bengt, 2014**).

Le principe majeur de la cartographie est la représentation de données sur un support réduit représentant un espace généralement réel. L'objectif de la carte, c'est une représentation concise et efficace, la simplification de phénomènes complexes (politiques, économiques, sociaux, etc.) à l'oeuvre sur l'espace représenté afin de permettre au public une compréhension rapide et pertinente. La création de carte débute avec la définition du projet cartographique. Elle sert à mieux comprendre l'espace, les territoires et les paysages. Elle est aussi utilisée dans des sciences connexes, démographie, économie dans le but de proposer une lecture spatialisée des phénomènes.

Il existe de nombreux types de cartographies posant des problématiques spécifiques de relevé d'informations. Ci-dessous quelques exemples: Cartographie physique, biologique, humaine (statique), politique /administrative/, des flux et la cartographie historique.

Qu'est-ce qu'une carte? (*du grec «Khartès»: Feuille de papyrus*)

Par définition, une **carte** est une représentation visuelle d'un territoire terrestre, maritime ou céleste. Les cartes servent à comprendre l'espace qui se trouve au-delà de notre champ visuel. C'est un outil universel, qui permet de transmettre l'information spatiale par-delà les langues et les cultures (**SGRC, 2014**).

Une **carte** est une image, la représentation conventionnelle d'un phénomène dans l'espace. C'est un dessin à plat, en général sur papier ou sur des supports très divers : bois, verre, métal, plastique, écran d'ordinateur.

On peut classer les cartes selon leur échelle, selon leurs contenus mais aussi selon leur ancienneté.

La carte topographique

• **Topographie** (du grec «*topos*» qui signifie *lieu* et de «*graphen*» signifiant *décrire*): Est une description graphique, une représentation sur un support plan d'une portion de la

surface terrestre, avec sa configuration. (<https://fr.wikipedia.org/wiki/Topographie>)

• **Carte topographique:**

La **carte topographique** est la représentation plane à une échelle déterminée d'une partie de la surface terrestre (**Cours géologie.com 2014**).

Les cartes topographiques sont des cartes d'état-major, sur lesquelles figurent essentiellement les résultats des observations directes concernant la position planimétrique (x,y) et altimétrique (z), la forme, la dimension et l'identification des phénomènes concrets fixes et durables existant à la surface du sol (aspect descriptif de la physionomie du terrain). L'échelle varie de 5 000 au 100 000 selon le degré de développement du Pays (**Nabed, 2020**).

Les informations les plus importantes qu'on trouve sur une carte topographique

❖ La carte est un document portant:

* un **titre**: généralement le nom d'une commune située sur la carte;

* un cadre comprenant la **surface cartographiée** et les **coordonnées géographiques** en ω , α et Z ;

* **l'échelle** et la **légende**.

❖ Sur la surface cartographiée, sont représentés:

* La **toponymie** (noms des lieux) et les données de l'**urbanisme** (constructions...);

* L'**hydrographie** (vallées, rivières, lac, ...) et la **végétation**.

* L'**orographie** ou le **relief** (courbes de niveau et point cotés).

Lecture de la carte

I.2.2.1. Echelle d'une carte (E):

- Est le rapport entre une distance **d** sur la carte et la distance correspondante réelle **D** sur le terrain.

$$E = d/D$$

- C'est le rapport entre les distances sur une carte et les distances actuelles, réelles, qu'elles représentent.

- *L'échelle de la carte correspond à l'inverse du rapport entre les distances réelles sur le terrain et leur représentation sur la carte. Elle s'exprime par une fraction dont le numérateur est toujours 1 (1 exprime l'unité de mesure considérée, quelle qu'elle soit : cm, dm, m) et le dénominateur un nombre qui est le diviseur des longueurs réelles et permettant d'obtenir les longueurs réduites.*

En fonction de l'importance du dénominateur de l'échelle, on qualifie cette dernière de grande ou de petite :

- **Une carte est dite à grande échelle**

Quand la réduction qu'elle permet est faible, donc quand le dénominateur est petit. Dans ce cas, l'espace cartographié est peu étendu. Parmi les cartes à grande échelle, les principales éditées en France sont le 1/10 000^e et le 1/25 000^e. Les cartes à 1/50 000^e et à 1/100 000^e sont appelées cartes à moyenne échelle.

- **Une carte est dite à petite échelle**

Quand la réduction qu'elle permet est grande, la fraction étant petite (un grand dénominateur). Dans ce cas, il est possible de représenter des phénomènes localisés sur de très grands espaces: un continent, un pays ou une région entière. Les principales cartes à petite échelle sont celles à partir du 1/100 000^e jusqu'à 1/200 000 000^e (ex: les cartes d'atlas).

Exemple : Si deux points sont distants de 5 km sur le terrain et de 10 cm sur la carte, l'échelle de celle-ci est :

- $E = 10 \text{ cm} / 5 \text{ km} = 10 \text{ cm} / 500.000 \text{ cm} = 1 / 50.000$. La carte est dite au 50.000^{ème} ou à l'échelle 1/50.000.

- L'échelle **1/20000** veut dire que **1 centimètre** sur la carte représente **20000 centimètres** sur le **terrain** (soit 200 mètres).

Les échelles les plus courantes sont: le 1/25.000, 1/50.000, 1/100.000 et au-delà. L'échelle est d'autant plus grande que le dénominateur est plus petit.

✚ Sur un document cartographique l'échelle est indiquée sous une forme :

- Graphique: droites subdivisées en segments:



- Numérique: en forme de rapport numérique:

1/50000

I.2.2.2. La légende

La légende est un symbolisme figuratif conventionnel ou non qui montre sur la carte divers objets et phénomènes localisés sur l'espace géographique. Elle comporte deux grandes catégories de signes. Il s'agit des *signes altimétriques* et des *signes planimétriques*.

- Les *signes altimétriques* sont constitués essentiellement par les points cotés (PC) et les courbes de niveau. Ils évoquent donc les variations d'altitude dans un espace cartographié.

- Les *signes planimétriques* figurent les objets et les phénomènes naturels ou anthropiques localisables sur une petite ou grande surface. On peut citer entre autres :

- L'hydrographie indiquée par la couleur bleue ;
- La végétation en vert ;
- L'habitat rural et urbain ;
- Les voies de communication matérialisées par des traits d'épaisseurs et de couleurs variables ;
- Les lignes de transport d'énergie : gazoduc par exemple ;
- Les limites administratives des localités ;
- Les édifices religieux ;
- Les usines et entrepôts.

Planimétrie: Représentation sur une carte, à l'aide de signes conventionnels et d'indications écrites, les détails du terrain. Il s'agit de la représentation de ce que l'on trouve au sol: routes, bois, maisons, etc.

Les signes altimétriques et planimétriques sont toujours complétés par d'autres éléments d'ordre toponymique: noms des lieux, des organismes hydrographiques (les cours d'eau) et autres.

Les coordonnées géographiques

Par **coordonnées géographiques** (ou encore « **repères géographiques** ») d'un lieu, on entend la **latitude**, la **longitude** et le **niveau de la mer**. Pour se repérer à la surface de la planète, on peut utiliser un autre système appelé « repères cartographiques ».

Elles servent à repérer un point ou à localiser un phénomène à la surface du globe. Il s'agit notamment de la latitude, de la longitude et de l'altitude.



Latitude

Latitude est une **coordonnée géographique** représentée par une valeur angulaire. Elle correspond à l'**angle** formé par le **parallèle** d'un lieu avec le **plan de référence** (**l'équateur**) qui est considéré comme le parallèle d'origine.

La latitude de référence sur Terre est l'équateur.

A partir de l'équateur, la latitude varie entre 0° et 90° , positivement vers le Nord et négativement vers le Sud.

A partir de l'équateur, la latitude varie entre 0° et 100° , positivement vers le Nord et négativement vers le Sud.

La longitude

La **longitude** est une **coordonnée géographique** représentée par une valeur angulaire. – Elle correspond à l'**angle** formé par le **méridien** d'un lieu avec le **méridien Greenwich (de Paris)** qui est considéré comme le méridien d'origine.

La longitude de référence sur Terre est le méridien de Greenwich (de Paris).

A partir de Greenwich, la longitude varie entre 0° et 180° , positivement vers l'Est et négativement l'Ouest.

A partir de Paris, la longitude varie entre 0° et 200° , positivement vers l'Est et négativement vers l'Ouest.

Les coordonnées géographiques sont traditionnellement exprimées dans le Système sexagésimal (Degrés ($^\circ$) Minutes ($'$) Secondes ($''$)). L'unité de base est le **degré** d'angle (1 tour complet = 360°), puis la **minute** d'angle ($1^\circ = 60'$), puis la **seconde** d'angle ($1' = 60''$). Les mesures inférieures à la seconde sont notées avec le système décimal.

De nos jours, les notations équivalentes en minutes décimales ou degrés décimaux sont également utilisées :

- a. **DMS** Degré:Minute:Seconde ($49^\circ 30' 00'' - 123^\circ 30' 00''$)
- b. **DMD** Degré:Minute ($49^\circ 30.0' - 123^\circ 30.0'$)
- c. **DDD** Degré Décimal ($49.5000^\circ - 123.5000^\circ$), généralement avec 4 décimales.

Le système d'orientation

Une carte comporte nécessairement une orientation. Celle-ci est faite avec une direction s'exprimant par un **angle** ou « **gisement** » ou « **azimut** » calculé à partir du Nord. On distingue trois Nord sur les cartes :

- Le **Nord géographique** ou **Nord astronomique** est la direction indiquée par le plan des méridiens ;
- Le **Nord cartographique** ou **Nord Lambert** est donné par les méridiens du carroyage et fait un angle variable avec les méridiens géographiques ;
- Le **Nord magnétique** est indiqué par l'aiguille aimantée. Il forme un angle (ou déclinaison magnétique) qui varie avec le temps par rapport au Nord géographique.

La valeur de la déclinaison magnétique à la date de publication de la carte est donnée pour le point central de la feuille avec sa diminution annuelle en minutes centésimales (divisées en cent parties) ou en grades.

Les modes de représentation du relief sur les cartes topographiques

Il en existe deux systèmes :

- Système de hachures (abandonné car trop imprécis) ;
- Système de courbes de niveau.

📌 Courbes de niveau

- Une **courbe de niveau** ou **isoplèthe d'altitude** est, en cartographie, une ligne imaginaire qui joint tous les points situés à la même altitude (**Bargach, 2019**).

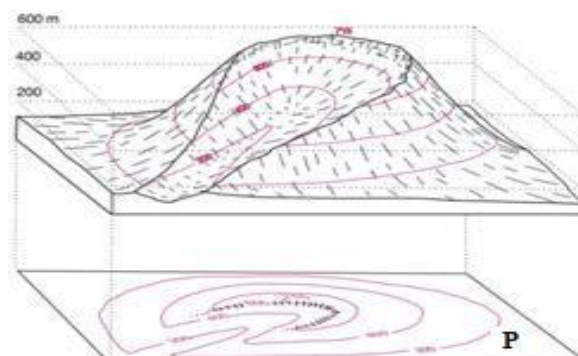
- On appelle **courbe de niveau** le lieu des points de la surface topographique ayant même altitude, c'est-à-dire l'intersection de la surface topographique avec un plan horizontal (**Sorel et al., 1999**).



a. Principe de l'établissement des courbes de niveau

Considérons une série de plans horizontaux (600, 400 et 200m) parallèles, équidistants qui coupent idéalement une surface topographique.

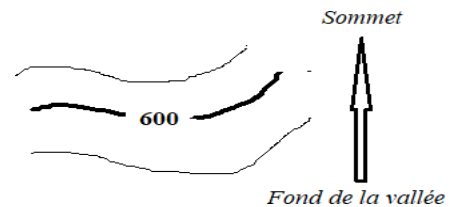
Les intersections de la colline avec ces plans sont reportés sur le plan P. Ces projections se nomment, **courbes de niveau** (**Sorel et al., 1999**).



La topographie de la surface terrestre est restituée par l'intermédiaire de courbes de niveau. Une courbe de niveau correspond à l'intersection de la surface topographique avec un plan horizontal d'altitude donné. Elle joint donc un ensemble de points de même altitude. La différence d'altitude entre les plans horizontaux est appelé équidistance des courbes de niveau.

b. Altitude des courbes de niveau

L'altitude des courbes est souvent indiquée le long de leur tracé. En principe le bas des chiffres indiquant le bas des chiffres indiquant cette altitude est dirigée vers le bas de la pente.



c. Équidistance et écartement

C'est la distance qui sépare deux plans horizontaux successifs : sur la carte elle correspond à la différence d'altitude entre deux courbes de niveau consécutives.

Il ne faut pas confondre l'équidistance avec l'écartement des courbes en projection sur la carte car :

- L'équidistance est constante;
- L'écartement est variable, il dépend du relief;

L'équidistance est indiquée dans la légende, en bas de la carte. Dans les zones plates à faible relief elle est de 5 à 10m ; pour les zones montagneuses, elle peut atteindre 20m, sinon une densité trop grande des courbes de niveau rendrait la carte illisible.

Si l'équidistance n'est pas indiquée, elle peut se calculer en comptant sur une pente toujours montante ou descendante, le nombre d'intervalles séparant deux courbes d'altitude connue est égale à la différence d'altitude entre ces deux courbes divisée par le nombre d'intervalles donnera l'équidistance.

✚ Propriétés des courbes de niveau

a. Différentes sortes de courbes de niveau (Figure 49)

- **Courbes maîtresses:** Elles sont dessinées en traits plus accentués qui indiquent toutes les courbes de rang 5 c'est-à-dire tous les 50 ou 100m, le plus souvent l'altitude est indiquée sur les courbes maîtresses ; noter que entre deux courbes maîtresses il y a toujours 4 courbes normales.

- **Courbes normales :** Elles sont dessinées en traits fins, elles s'intercalent entre les courbes maîtresses.

- **Courbes intercalaires:** Elles sont dessinées en général en tirette. Lorsque la

surface topographique est plate, les courbes de niveau sont espacées, pour amener plus de précision on est conduit à ajouter une courbe dite intercalaire dont l'altitude diffère d'une demi-équidistance de celle des deux courbes qui l'encadrent.

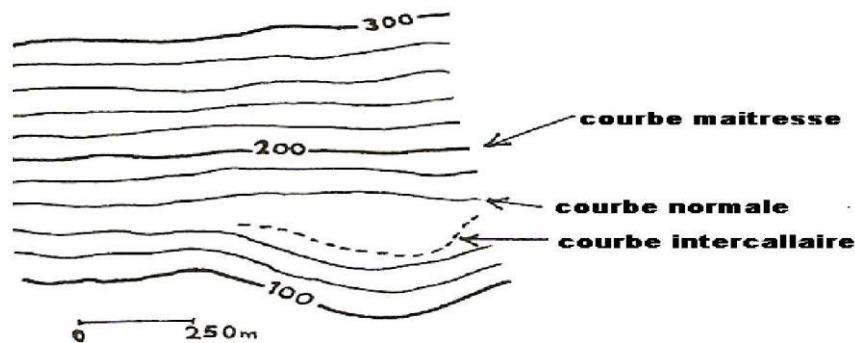


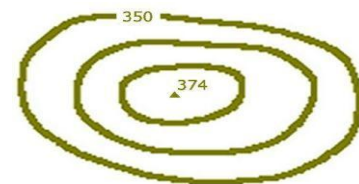
Fig.49: Différents types de courbes de niveau
(Source: Belhaded, 2010)

b. La densité des courbes de niveau

Rend compte du relief: les pentes fortes sont caractérisées par des courbes nombreuses et serrées; à des courbes espacées et peu nombreuses correspondent une région plate ou à faible pente.

c. Les points cotés

A côté des courbes de niveau, il existe un certain nombre de points remarquables où l'altitude exacte est donnée, permettant de trouver facilement la valeur des courbes de niveau proches.



Exemple : soit une carte où l'équidistance des courbes est de 10m, supposons qu'au sommet d'une butte il y ait un point coté 374m, la 1ère courbe entourant ce sommet et donc de valeur inférieure sera la courbe 370 car elle sera un multiple de 10.

+ Caractéristiques des courbes de niveau

- a- Détermination de l'altitude d'un point;
- b- // de la pente ;
- c- // de la forme des terrains;
- d- Éléments fondamentaux pour l'exécution du profil topographique.

PROFIL TOPOGRAPHIQUE

Le profil topographique

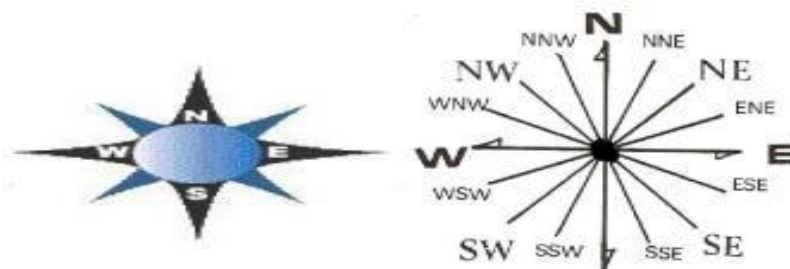
Définition: Un profil topographique est une section par un plan vertical de la surface topographique, ce profil qui sera représenté à une certaine échelle, doit rendre compte des formes du relief (**Belhaded, 2010**).

Principe de l'exécution d'un profil topographique

Nous suivons les étapes suivantes:

- On trace un trait AB sur une carte à l'échelle E (donnée) ;
- Ensuite sur un rectangle de papier millimétré on trace 2 axes perpendiculaires, celui des abscisses correspondra à l'échelle des longueurs, celui des ordonnées à l'échelle des hauteurs (altitude) ;
- Choisir l'origine de l'axe des hauteurs en fonction de l'altitude la plus basse ;
- Faire coïncider le bord supérieur du papier millimétré contre le trait de coupe AB. Marquer sur ce papier les points A'B' homologues de A et B, ensuite noter les altitudes de ces points et celles des points d'intersection des courbes de niveau avec le trait AB ; ceux-ci étant destinés à disparaître, les inscrire légèrement ;
- Ces points sont abaissés (projetés) à leur altitude correspondante sur l'axe des hauteurs précédemment dessiné.
- Ces points ainsi abaissés seront reliés entre eux, non pas des segments de droite, mais par des courbes rendant compte au mieux de la topographie, les versants avec leur concavité et leur convexité au bon endroit, indiquer les sommets ou les vallées avec leur forme ;
- On effacera alors les inscriptions ayant servi à la construction de la coupe ;
- Terminer la coupe en notant au-dessus du profil la toponymie et l'orientation ;
- Orientation du profil : pour l'orientation du profil se reporter à la 'rose' ; il faut la dessiner sur un papier transparent, cette rose doit être placée au centre de la coupe de façon que la direction NS soit parallèle au méridien le plus proche du trait de coupe (Nord de la carte).

Rose des vents



Un exemple de profil topographique achevé (on parle d'habillage) est donné plus bas. On s'apercevra à l'usage, que ces opérations sont en réalité simples et rapides.

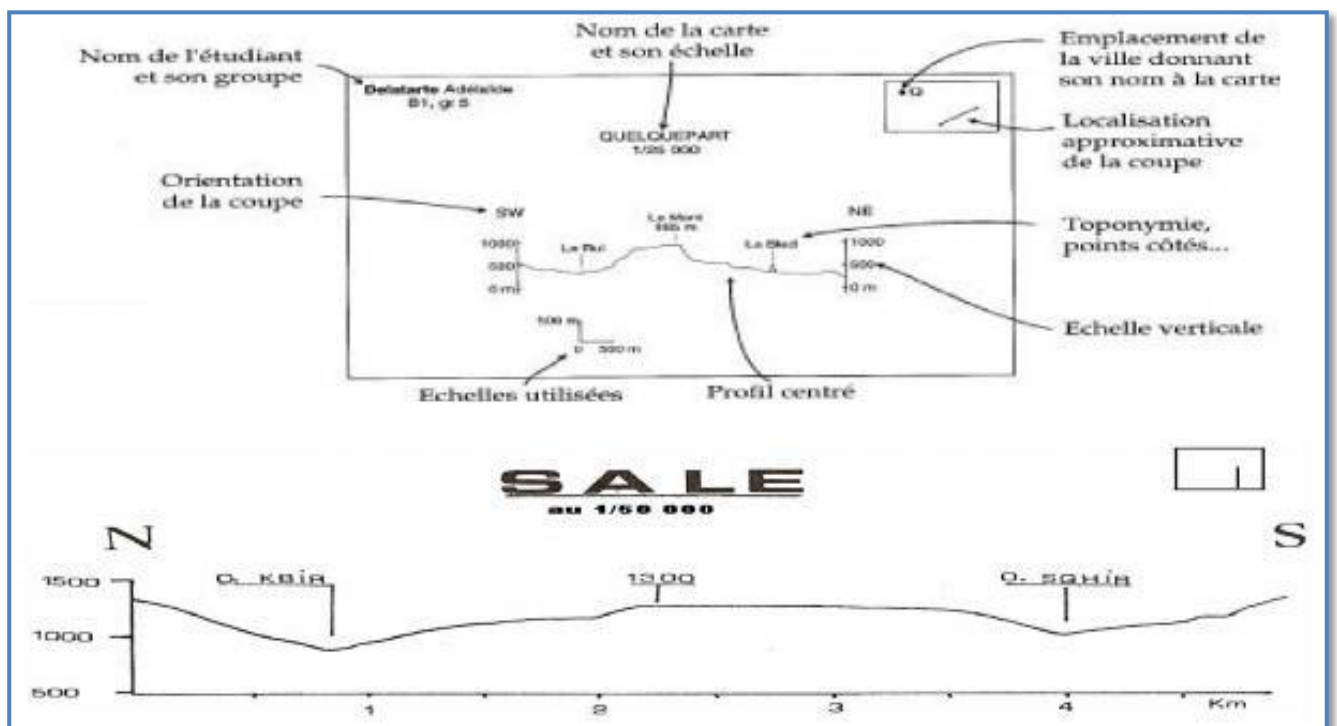
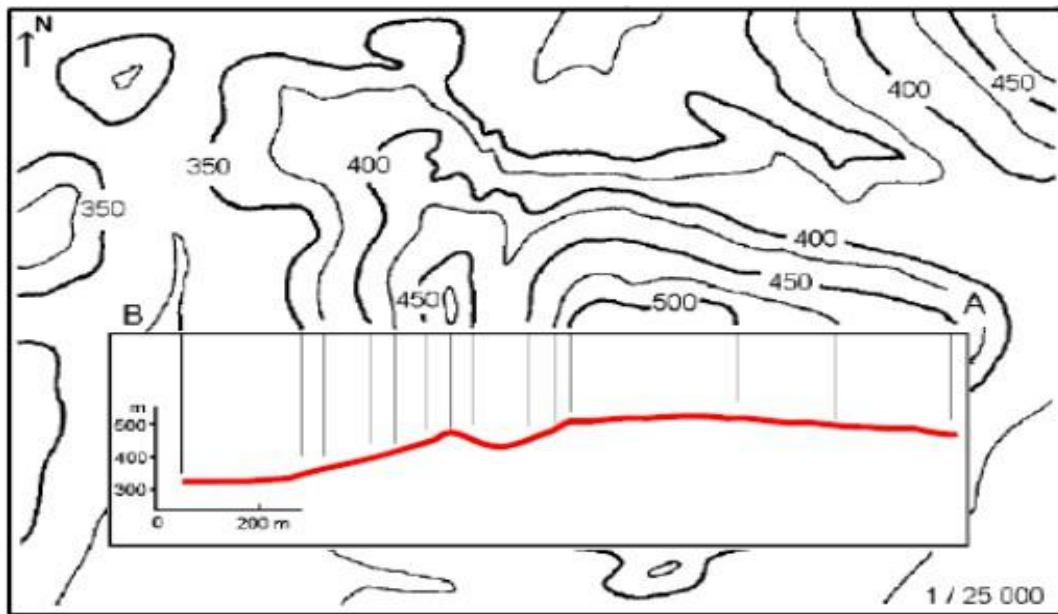


Fig.50: Réalisation du profil topographique
(Source: Belhaded, 2010)

II. Carte et coupe géologique

Carte géologique

Introduction

La *carte géologique* constitue le support indispensable pour l'étude des formations géologiques et la reconstitution de leur histoire. L'objet de ce manuel est une initiation à l'acquisition des techniques de base pour d'une part, la lecture des cartes géologiques, et d'autre part la réalisation des coupes géologiques. Cette introduction s'appuie sur des notions géométriques et géologiques (morphologie, tectonique et stratigraphie), selon un ordre de difficulté croissant.

La *carte géologique* est un document important pour l'étude de l'écorce terrestre en ce sens qu'elle fournit beaucoup de renseignements sur la structure lithologique, tectonique, et sur l'évolution paléogéographique. Sa construction est faite par les géologues et elle répond à des besoins différents de ceux des géographes.

Une *coupe géologique* est la représentation de la géométrie des terrains et des structures géologiques le long d'un trait de coupe. Elle est élaborée à partir des informations recueillies au sein de la carte géologique dans laquelle elle s'insère, ainsi que, lorsqu'elles sont disponibles, des données de terrain, comme des logs de forage ou des profils sismiques.

Définitions

La carte géologique est une représentation sur un fond topographique des différentes formations géologiques qui affleurent à la surface du sol (ou masquées par une faible épaisseur de formations superficielles récentes : sol, terre végétal, éboulis,...), par la projection de leurs contours géologiques, c'est à dire l'intersection des limites géologiques avec la surface topographique (**Assoma, 2014**).

*Nous considérons une **formation géologique** comme un volume de roche que l'on identifie sur un ou des critères particuliers, comme par exemple la **lithologie** ou l'**âge**.*

La plupart des cartes géologiques sont des cartes lithostratigraphiques. Les roches y sont classées par formation et sont identifiées par leur lithologie (type de roches) et leur ordre de sédimentation (succession géologique ou stratigraphie) : ce qui résulte en une carte colorée facile à consulter. La plupart des cartes à moyenne (1/50 000) et grande échelle sont de ce type.

- Elle comprend les données de la carte topographique complétées par des données géologiques issues essentiellement d'observations de terrain ;

- Sa lecture et sa compréhension permettent au géologue, grâce à la réalisation de coupes géologiques, d'avoir une vision en profondeur des structures géologiques et donc de pouvoir appréhender l'histoire géologique d'un secteur ou d'une région.

Ces cartes indiquent aussi :

- L'inclinaison des couches sédimentaires ou pendage qui est indiqué par un signe conventionnel ;
- Les failles ou les chevauchements qui sont indiqués par un trait plus épais ;
- L'emplacement des carrières ;

Accompagnant cette carte il y a aussi une notice explicative qui précise :

- Les caractères des diverses formations sédimentaires, leur épaisseur, leur contenu en fossiles ;
- Toutes les remarques sur la disposition et l'interprétation des accidents tectoniques.

Présentation générale de la carte géologique

La carte géologique se présente, comme la carte topographique sous la forme d'un document à plat mais se distingue au premier regard par la présence de nombreuses **couleurs** et **figurés** correspondants aux données géologiques (la représentation des terrains en fonction de leur âge).

❖ **Sur une carte géologique, chaque formation géologique est représentée par :**

1- Une **couleur conventionnelle**.

2- Une **notation** (ou indice) : Une **lettre** plus un **chiffre** (ex. **C³**), la **lettre** représente le système (Unité stratigraphique) et le **chiffre** représente le l'étage (Unité stratigraphique).

- **Le chiffre peut arabe** : Il est utilisé en exposant : **C¹C²C³**, On monte dans la série c'est-à-dire que **C¹** est plus ancien que **C²**, **C³** plus ancien que **C⁴**..... Par contre ;

- **Le chiffre peut romain** : Il est utilisé en exposant : **C_IC_{II}C_{III}**, On descend dans la série c'est-à-dire que **C_I** est plus jeune que **C_{II}**, **C_{III}** plus jeune que **C_{IV}**.....

➤ **Les données stratigraphiques**

Les couleurs correspondent principalement aux **âges** des formations géologiques rencontrées sur la zone cartographiée. Par convention, chaque **période** ou **étage** géologique correspond à une couleur et leur subdivision à des dégradés de ces couleurs.

Une **lettre** ainsi qu'un **chiffre** (appelé **indice**) sont surimposés à la couleur afin de faciliter la lecture.

Les âges (couleur et indices) sont reportés dans la légende de la carte sous forme de petits

rectangles (appelés cartouches) disposés par ordre chronologique, le plus jeune étant situé en haut à gauche.

Sur le fond de carte, la largeur d'une couleur ne correspond pas à l'épaisseur de la formation géologique mais à l'intersection de cette dernière avec la topographie. Par conséquent, l'égalité largeur de la couleur-épaisseur de la formation géologique ne sera vérifiée que pour les formations verticales.

a- Propriétés géométriques des terrains:

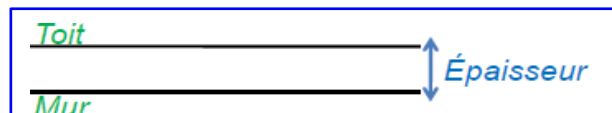
Un terrain: Est un ensemble de couches (strates).

Une couche: On appelle strate la plus petite division (unité) lithologique. Une strate est définie:

- Par deux plans ou deux surfaces parallèles, le « mur » et le « toit ».

On appelle **toit** d'une couche le sommet de la couche ou sa limite supérieure, le **mur** étant sa partie basale ou sa limite inférieure.

- Par son épaisseur:
- Par son faciès.



Notion de faciès : C'est l'ensemble des caractères pétrographiques et paléontologiques qui caractérisent une roche. Certains de ceux-ci permettent d'en préciser les conditions de dépôt. Certaines couches peuvent présenter des variations latérales de faciès d'un point à l'autre (Figure 51).

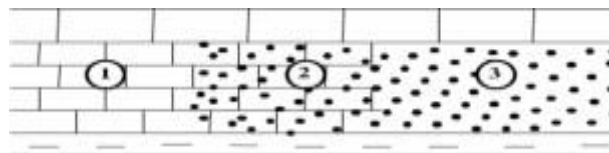


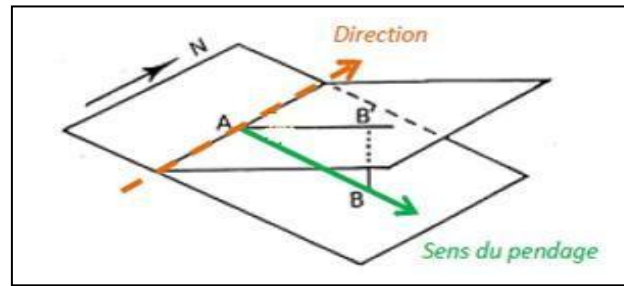
Fig.51: Passage latéral de faciès: 1. Calcaire 2. Calcaire gréseux 3. Sable (Source: Ait Malek et al., 2020)

b- Orientation d'une surface (couche) géologique plane: Elle est déterminée par:

✚ La **Direction** de la surface (couche), qui est l'orientation par rapport au N magnétique de la droite d'intersection d'un plan horizontal avec la surface plane considérée.

Direction de la couche : C'est l'intersection du plan de la couche avec le plan horizontal.
 ✚ Le **Pendage**, qui regroupe deux mesures:

- Lesens du **pendage** qui est la direction de la ligne de plus grande pente (repéré par rapport aux points cardinaux).
- La **valeur angulaire de l'angle** entre le plan horizontal et la surface plane considérée.



- Sur le terrain, le pendage est mesuré à l'aide d'un clinomètre et son sens avec une boussole.
- Sur les cartes géologiques, le pendage des couches est indiqué par une sorte de flèche en forme de T dont la pointe est dirigée dans le sens du pendage.
- La valeur du pendage est indiquée par un chiffre ou par une longueur plus ou moins grande de la branche fléchée du T.

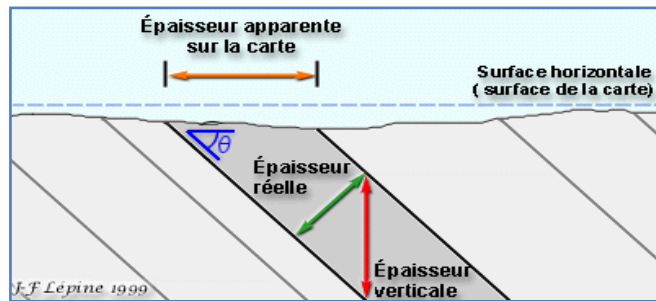
Ladirection et lesens du pendage sont par définition perpendiculaires entre eux.

c- Symboles de représentation du pendage

Sur la carte le pendage d'une couche est représenté par un symbole représentant direction et sens du pendage, accompagné ou non de la valeur angulaire du pendage.

Signes de pendage	
$\frac{ }{60} \vdash$	Pendage incliné de la stratification
\vdash	Pendage vertical
$+$	Pendage horizontal
$\frac{\vdash}{35}$	Pendage de série renversée
\vdash	Schistosité métamorphique

d- L'épaisseur apparente et réelle des couches



e- Représentation des directions et pendages sur une carte et en coupe géologique

Pendage:	faible ($\alpha < 30^\circ$)	moyen ($30^\circ < \alpha < 60^\circ$)	fort ($\alpha > 60^\circ$)	vertical ($\alpha = 90^\circ$)	horizontal ($\alpha = 0^\circ$)
Carte:					
Coupe:					

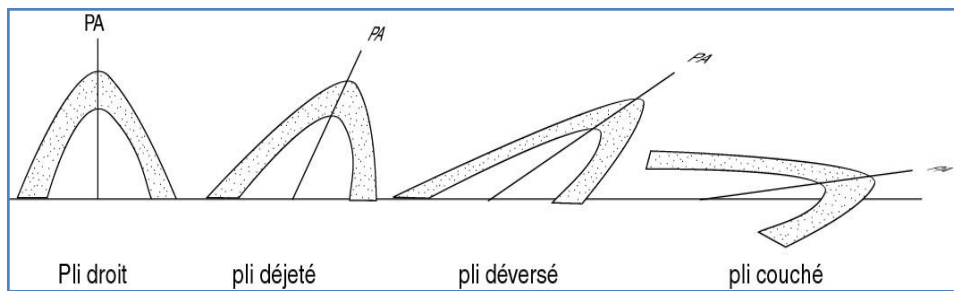
e: épaisseur de la couche; L.aff: sa largeur d'affleurement

➤ **Les données de la tectonique:**

Superposées aux données stratigraphiques s'ajoutent les informations tectoniques. Elles permettent de figurer sur un document plan les données géométriques en trois dimensions des différentes formations géologiques : Failles, plis, pendages, chevauchements... L'ensemble des signes et des figurés, appelés **symboles**, ainsi que leur signification sont reportés dans la légende de la carte.

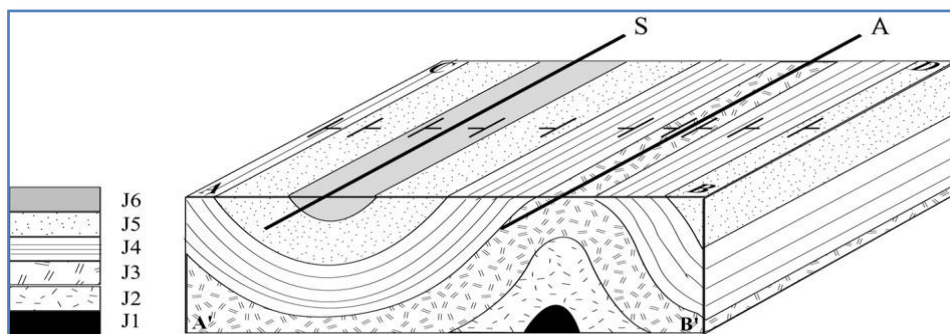
a. Les structures plissées

✚ **Les différents types de plis :** En fonction de la géométrie du plan axial, on peut distinguer différents types de plis :



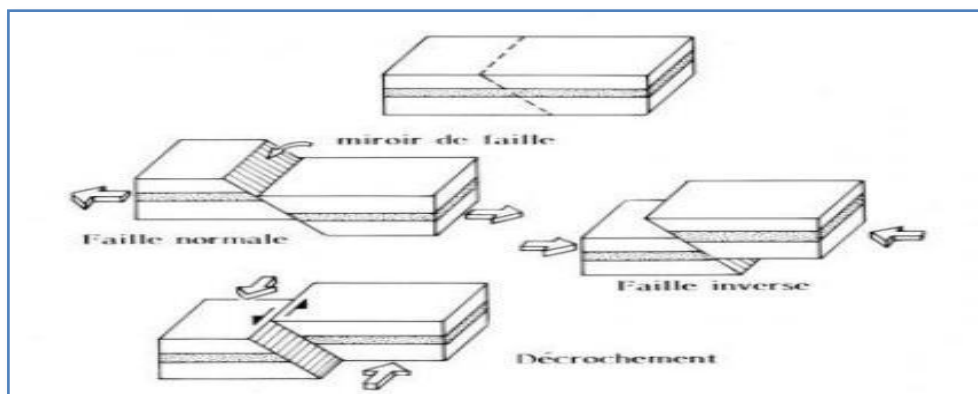
✚ **Reconnaissance des structures plissées sur une carte géologique**

:(Voir l'élément III.1.3.2.2. La déformation souple des roches : Les plis. Cours de Géologie).



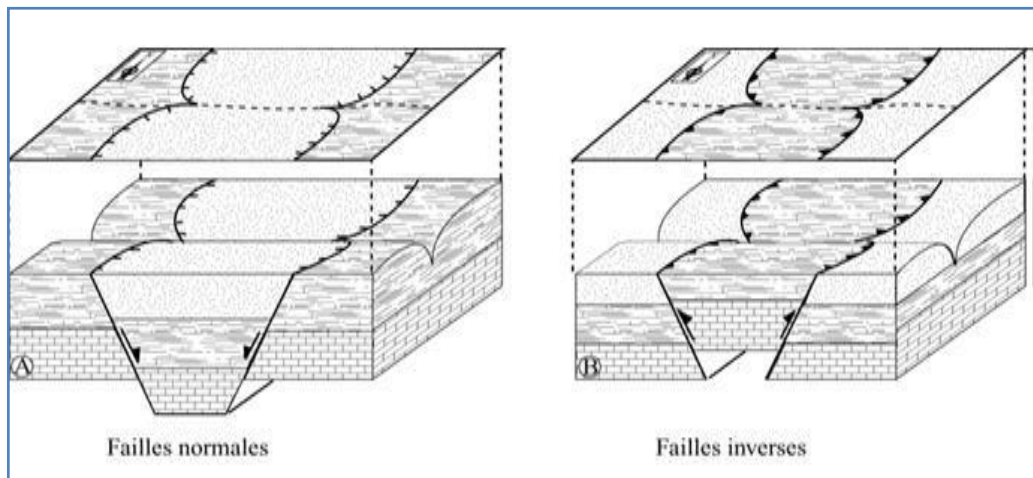
b. Les structures faillées:

✚ **Différents types de failles:**



✚ **Reconnaissance des structures faillées sur une carte géologique:**

Une faille se marque par un trait noir épais sur la carte géologique.



➤ **Les données du métamorphisme et des structures intrusives:**

Une **formation métamorphique** est représentée par la couleur correspondant à son âge sur laquelle on surimpose un figuré (pointillés, tirets...) témoignant du degré de métamorphisme.

Les **formations intrusives** (corps **granitiques** par exemple) sont de couleur chaude et vive (comme le rouge) accompagnée d'un figuré et d'un indice caractéristique.

Utilité d'une carte géologique:

Une carte géologique et sa coupe, peuvent être très utiles si l'on sait s'en servir. Elle peut nous permettre de déterminer la façon donc les couches rocheuses sont disposées puis déduire leur allure en profondeur (coupe géologique) ou bien de savoir comment aurait pu être leur forme avant une érosion. Tout cela traite du domaine scientifique mais une carte géologique peut être aussi pour d'autres domaines. Elle permet de situer des endroits favorables pour des constructions, déterminer l'emplacement de matériaux recherchés, ou encore situer des gisements naturels.

COUPE GÉOLOGIQUE

Lacoupegéologique

Il existe trois principales méthodes d'étude d'une carte géologique :

1. Établir son *commentaire géologique*;
2. Établir son *schéma structural*;
3. Réaliser des *coupes géologiques*.

Définition

Une *coupe géologique* est une représentation, selon une section verticale, des terrains cachés en profondeur en n'en connaissant que la partie qui affleure. La coupe géologique s'appuie donc sur une part d'hypothèses et d'interprétations déduites, logiquement, des indications de la carte. En définitif, si la carte est bien levée, et lue correctement, ces diverses interprétations ne diffèrent généralement que fort peu.

Il faut noter que des données complémentaires, comme des sondages ou des données géophysiques, peuvent aider à rendre une coupe géologique plus exacte.

Une coupe géologique est généralement prise perpendiculairement à la direction des structures géologiques.

Il faut noter que des données complémentaires, comme des sondages ou des données géophysiques, peuvent aider à rendre une coupe géologique plus exacte. Une coupe géologique est généralement prise perpendiculairement à la direction des structures géologiques. Les couches géologiques se présenteront de plusieurs manières sur le terrain.

On distingue :

- La structure horizontale (tabulaire);
- La structure inclinée (monoclinale);
- La structure plissée;
- Les contacts anormaux qui traduisent : des discordances, des failles, des phénomènes éruptifs.

Démarche à suivre : Principe de l'exécution d'une coupe géologique

- i) Exécuter le profil topographique de la coupe demandée;
- ii) Repérer sur le bord supérieur du papier millimétré, les limites des affleurements géologiques, puis les abaisser sur le profil topographique ;
- iii) À partir de ces points, dessiner la section de terrain en profondeur, en reliant entre eux les différents affleurements. Cette étape, la plus délicate, dépend du type de structure géologique considérée. Deux règles fondamentales sont toutefois à respecter :

- Il faut commencer par dessiner la couche la plus récente dont on connaît le toit partout où elle affleure, puisque les autres couches doivent se mouler sur elle.

- Appliquer les valeurs de pentages déduites de la carte et donner aux couches les épaisseurs indiquées sur la légende et les maintenir constantes, sauf indication contraire, tout le long de la coupe.

iv) De façon générale, l'ordre chronologique classique (quand ces structures existent) est : i) faille et/ou surface de discordance ; ii) synclinaux ; iii) anticlinaux.

v) Les alluvions laissées par les rivières lors de crues n'interviennent pas dans la structure géologique, on les représente à la fin par un trait de crayon plus épais sur le tracé du profil;

vi) Représenter chaque couche par un figuré conventionnel (habillage des couches) correspondant à sa nature lithologique ;

vii) Al'aide de la rose des vents, orienter la coupe (**Assoma, 2014**).

Représentation des figurés : Si, sur une carte géologique, les formations géologiques se distinguent par une couleur et une notation, dans une coupe géologique on leur affecte un figuré. Sur les figures ci-dessous sont représentés quelques-uns des figurés les plus utilisés.

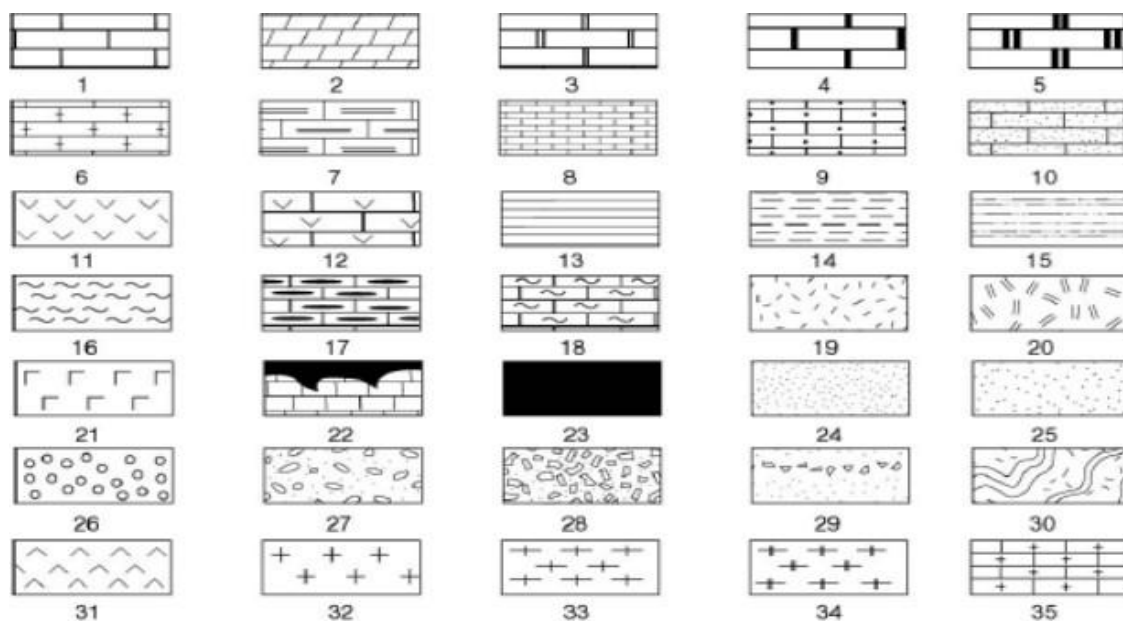


Fig.52: Exemples de figurés (habillage des couches)
(Source : I.f.é., 2021)

-1 à 10: calcaires (1 à 5, en bancs; 6: marneux; 7: à silex; 8: en plaquettes; 9 : conglomératiques ; 10 : gréseux) ; 11 et 12 : dolomies et calcaires dolomitiques; - 13 à 18: argiles et marnes (15: sableuses ; 17, 18: marno-calcaires); 19 et 20: roches massives

21 : roches salines ; 22 : dépôts en poches ; 23 : couche de faible épaisseur ou épaisseur variable ; - 24 à 29 : roches détritiques (24 : sables ; 25 : grès ; 26 et 27 : conglomérats ; 28 et 29 : brèches ; 30 : socle plissé ; - 31 : roche éruptives basiques ; 32 : roches intrusives acides ; - 33 à 35 : roches métamorphiques (33 et 34 : schistes cristallins ; 35 : calcaires métamorphiques).

▪ **Représentation des figurés (disposition des couches déformées)**

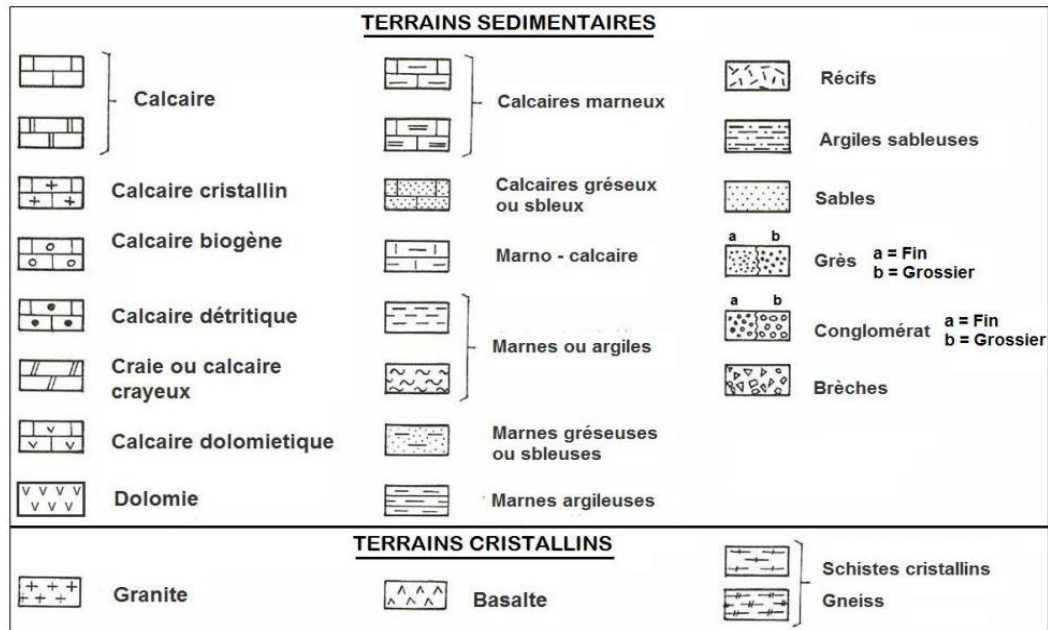
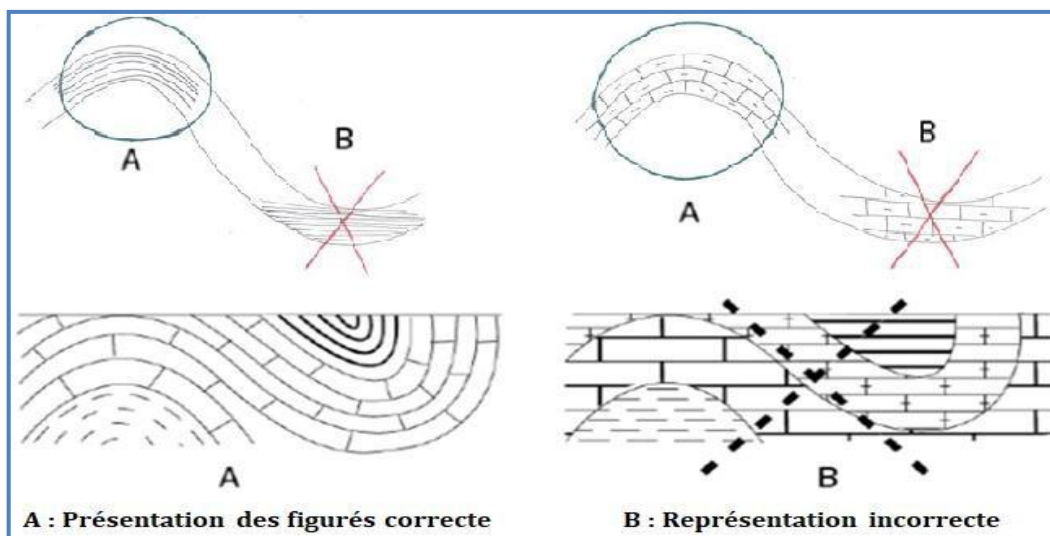


Fig.53: Représentation des figurés (terrain sédimentaires/cristallins)

Le dessin des figurés doit être réalisé soigneusement, en rapport avec les limites des couches, parallèlement ou perpendiculairement (fig. A) et non par rapport à l'horizontale de la coupe (fig. B).



▪ Représentation type d'une coupe géologique:

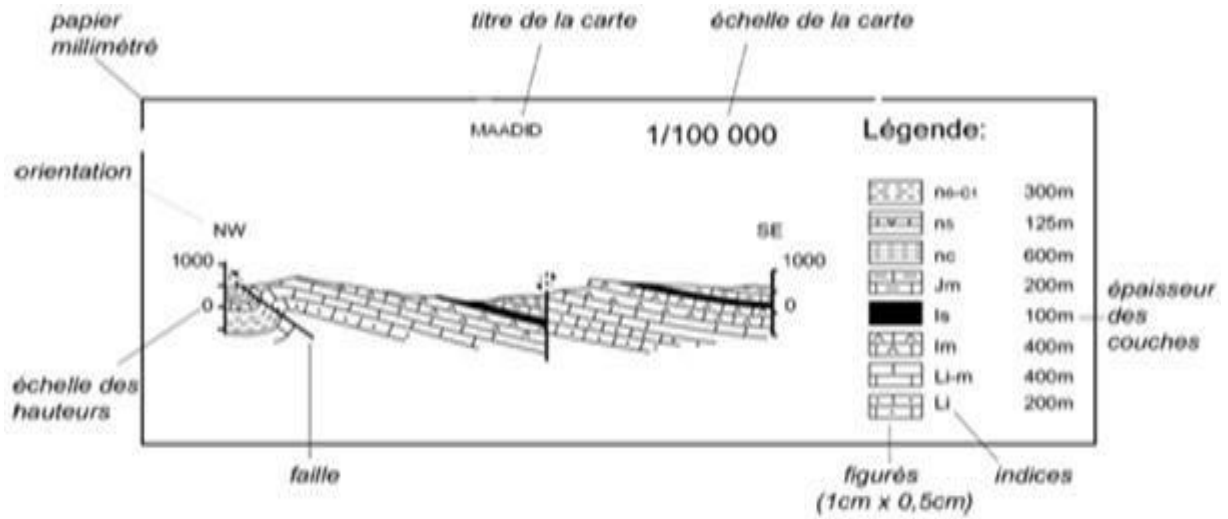


Fig.54: Représentation type d'une coupe géologique

ROCHES ET MINÉRAUX

III. Roches et Minéraux

Les minéraux

III.1.1. Définition

Minéral : substance solide, homogène, généralement inorganique, définie par sa composition chimique, ses propriétés physiques et cristallographiques.

Un minéral est une substance inorganique solide qui se présente sous forme d'un cristal ou d'un solide cristallin (**Togola, 2013**).

Un 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.

Caractéristiques des minéraux

Un minéral est caractérisé par ses propriétés physiques et chimiques :

Propriétés physiques des minéraux / Critères d'identification

- *Forme cristalline (système cristallin)* : La forme géométrique des cristaux est définie par leur structure cristalline : minéraux dans la nature sous forme de polyèdres. Ex. l'halite cristallise dans le système cubique ;

- *Dureté* : Résistance du minéral à se laisser rayer.

Échelle de dureté de Mohs basée sur 10 minéraux témoins: chacun raye le précédent et est rayé par le suivant :

Tab.10. Dureté des minéraux

Dureté	Minéral	effet	Composition	Système
1	Talc,	friable avec l'ongle	Mg ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	monoclinique
2	Gypse	rayable avec l'ongle	CaSO ₄ ·2H ₂ O	monoclinique
3	Calcite	rayable avec le verre	CaCO ₃	rhomboédrique
4	Fluorite	rayable au couteau et au verre	CaF ₂	cubique
5	Apatite	rayable au couteau et au verre	Ca ₅ (PO ₄) ₃ (OH-, Cl-, F-)	hexagonale
6	Orthose	rayable à la lime (acier trempé)	KAlSi ₃ O ₈	monoclinique
7	Quartz	raye le verre et l'acier trempé	SiO ₂	trigonal
8	Topaze	rayable par le carbure de tungstène	Al ₂ SiO ₄ (OH-, F-) ₂	orthorhombique
9	Corindon	rayable au carbure de silicium	Al ₂ O ₃	rhomboédrique
10	Diamant	rayable avec un autre diamant	C	cubique

(Source: Brusseaux, 2000)

- *Couleur*: En général, les minéraux présentent une grande diversité de couleur;
- *Ténacité*: Résistance au choc: minéraux fragiles; minéraux friables;

- *Densité* : Rapport entre le poids du minéral et le poids du volume d'eau qu'il déplace : *poids par unité de volume* ;
- *Éclat* : Aspect de la surface du minéral lorsqu'il réfléchit la lumière : éclat métallique ou non métallique (vitreux, nacré, mat, gras,...) ;
- *Transparence* : Propriété du minéral à laisser passer la lumière : minéraux transparent, translucide ou opaque ;
- *Clivage* : Propriété du minéral de se casser selon des plans déterminés : plans de faiblesse dans la structure cristalline du minéral ;
- *Cassure* : Propriété du minéral de se casser, de se briser en donnant des surfaces irrégulières : cassure conchoïdale ;
- *Trace ou trait* : Couleur de la poudre du minéral : trace laissée par un minéral lorsqu'on le frotte sur une plaque de céramique non émaillée ; ex. la pyrite, de couleur jaune or, laisse un trait noir ;
- *Indice de réfraction* : La réfraction est la déviation d'un rayon lumineux qui passe d'un milieu à un autre ;
- *Conductibilité électrique* : Capacité d'un minéral de conduire l'électricité : minéraux conducteurs et minéraux non conducteurs ;
- *Magnétisme* : Capacité de minéraux riches en fer à se faire attirer par un aimant ;
- *Photoluminescence* : Émission de lumière lorsqu'un minéral est éclairé par une lumière de forte énergie (rayons ultraviolets) par exemple : Calcite, Fluorite ;
- *Radioactivité* : Quelques minéraux émettent un rayonnement invisible : Alpha, Bêta, Gamma par exemple : Uraninite, Thorite.

Propriétés chimiques des minéraux / Critères d'identification

- *Composition chimique* : Éléments chimiques qui composent le minéral :
 - Les minéraux peuvent être composés d'un seul élément chimique. Ex. - Graphite (C) - Diamant (C) ;
 - Les minéraux peuvent être composés de plusieurs éléments chimiques. Ex. - Amazonite ($KAlSi_3O_8$) - Chalcopyrite ($CuFeS_2$) ;
- *Solubilité* : Propriété d'un minéral à se dissoudre dans l'eau ou dans un autre liquide (acide) ;
- *Effervescence* : Acides sulfuriques - Propriété de minéraux de la classe des carbonates à réagir avec certains types d'acide (acide chlorhydrique). Cette réaction produit

ungaz carbonique.

Classification des minéraux

La classification des minéraux correspond à une répartition des espèces minérales basées notamment sur la composition chimique des minéraux. On distingue **neuf classes de minéraux** :

✓ **Classe I: Éléments natifs:**

Les éléments natifs sont des minéraux formés d'un seul élément chimique. Les éléments natifs ont un grand rôle économique. Exemples : Or (Au), Diamant (C), Graphite (C), Platine (Pt), Argent (Ag), Cuivre (Cu) ;

✓ **Classe II: Sulfures:**

Les sulfures sont des minéraux formés d'un ou plusieurs métaux combinés à du soufre (S). Ex. Pyrite (FeS_2), Chalcopyrite (CuFeS_2), Galène (PbS) ;

✓ **Classe III: Halogénures :**

Les halogénures (chlorures (Cl^-) et fluorures (F^-)) sont des minéraux formés d'un ou plusieurs métaux ou métalloïdes combinés à l'élément chlore ou fluor. Ex. Sel gemme (NaCl), sylvite (KCl), Fluorine (CaF_2) ;

✓ **Classe IV: Oxydes:**

Les oxydes (O^{2-}) sont des minéraux formés d'un ou de plusieurs métaux combinés à de l'oxygène. Ex. Magnétite (Fe_3O_4), Corindon (Al_2O_3), Rutile (TiO_2) ;

✓ **Classe V: Hydroxydes:**

Les hydroxydes (OH^-) sont des minéraux constitués d'une combinaison d'eau et d'oxydes métalliques. Ex. Goéte ($\text{FeO}(\text{OH})$), Brucite ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) ;

✓ **Classe VI: Sulfates:**

Les sulfates (SO_4^{2-}), sont des minéraux constitués d'une combinaison de soufre et d'oxygène avec un ou plusieurs métaux ou métalloïdes. Ex. Gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), Barytine (BaSO_4) On inclut dans cette classe les chromates (CrO_4^{2-}), les molybdates (MO_4^{2-}) et les tungstates (WO_4^{3-}) ;

✓ **Classe VII: Carbonates :**

Les carbonates (CO_3^{2-}) sont des minéraux constitués d'une combinaison de carbone et d'oxygène avec un ou plusieurs métaux ou métalloïdes. Ex. Calcite (CaCO_3), Sidérite (FeCO_3), Dolomite (CaMgCO_3) On inclut dans cette classe les nitrates (NO_3^-) et borates (BO_3^{2-}) ;

✓ **Classe VIII: Phosphates:**

Les phosphates (PO_4^{3-}) sont des minéraux constitués de phosphore et d'oxygène combinés 116

avec un ou plusieurs métaux ou métalloïdes. Ex. Apatite ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH}, \text{Cl}, \text{F})$), Monazite ($(\text{Ce}, \text{La}, \text{Y}, \text{Th})\text{PO}_4$). On inclut également dans cette classe les arsénates (AsO_4^{3-}) et les vanadates (VO_4^{3-});

✓ **Classe IX: Silicates:**

Les silicates (SiO_4^{4-}) sont des minéraux qui combinent le silicium et l'oxygène avec un ou plusieurs métaux ou métalloïdes. Les silicates représentent 90 % en poids de l'écorce terrestre. Ex. Quartz (SiO_2), Sillimanite (Al_2SiO_5), Microcline (KAl_2SiO_5).

Tab.11. Classification des minéraux

GROUPE	MINÉRAL	FORMULE	USAGE
ÉLÉMENTS NATIFS	Or Argent Cuivre Diamant Graphite Soufre Platine	Au Ag Cu C C S Pt	Échange, joaillerie joaillerie, photographie conducteurs électriques gemmes, abrasifs mines à crayons, lubrifiants médicaments, produits chimiques catalyseurs, alliages
OXYDES	Hématite Magnétite Corindon	Fe_2O_3 Fe_3O_4 Al_2O_3	minerais de fer minerais de fer gemme, abrasif
SULFURES	Galène Sphalérite Pyrite Chalcopyrite Bornite Cinabre	PbS ZnS FeS_2 CuFeS_2 Cu_5FeS_4 HgS	minerais de plomb minerais de zinc "or des fous" minerais de cuivre minerais de cuivre minerais de mercure
SULFATES	Gypse Anhydrite Barite	$\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ CaSO_4 BaSO_4	plâtre et panneaux plâtre et panneaux boue de forage
CARBONATES	Calcite Dolomite Malachite Azurite Rhodochrosite	CaCO_3 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ $\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$ $\text{Cu}_3(\text{OH})_2(\text{CO}_3)_2$ MnCO_3	ciment Portland ciment Portland minerais de cuivre, joaillerie minerais de cuivre, joaillerie joaillerie
SILICATES	quartz talc amiante kaolinite	SiO_2 $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ $\text{Mg}_6\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ $\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	verre, horlogerie, calculatrices poudre pour bébés isolant céramique
HALOGÉNURES	Halite Fluorite Sylvite	NaCl CaF ₂ KCl	sel commun fabrication des aciers fertilisants
HYDROXYDES	Limonite Bauxite	$\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$ $\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	minerais de fer, pigment minerais d'aluminium

(Source: Bourque, 2004)

Les roches

Définition

Une *roche* est un matériau formé par un agrégat naturel de minéraux, de fossiles, et/ou d'éléments d'autre(s) roche(s), (<http://www.geowiki.fr/index.php?title=Roche>).

Une *roche* est un matériau solide formé en général d'un assemblage de minéraux (Togola, 2013).

- *Roche* = tout matériau solide et cohésif constitué d'un assemblage de grains d'un/plusieurs minéraux en proportions variables, plus rarement de matière minérale vitrifiée : Une roche peut être constituée d'une ou de plusieurs espèces minérales.

- *Roches formées d'une seule espèce minérale*: ex. calcaires et marbres (calcite), quartzites (quartz) ;

- Roches formées de plusieurs espèces minérales: ex. granites, gneiss, basaltes.

Les roches sont constituées de minéraux, et les minéraux sont constitués d'éléments chimiques.

Classification des roches

En fonction de la composition minérale:

- **Roches mono-minérales, ou roches monominérale** : composées d'un minéral majoritaire, ex : Calcaire pur.
- **Roches pluri-minérales, ou roches pluriminérale** : agrégat de plusieurs minéraux, ex : Granite.

En fonction de l'homogénéité:

- **Roches dures et cohérentes** : "pierre";
- **Roches plastiques** : "argiles";
- **Roches meubles** : "arènes", "sables";
- **Roches fluides** = liquide : "huiles", pétroles;
- **Roches fluides** = gazeuse : "gaz".

En fonction de leurs modes et milieux de formations:

❖ **Roches exogènes** (formées en surface de l'écorce terrestre):

- **Roches sédimentaires / roches Déposées** (qui proviennent de l'accumulation et la consolidation de sédiments ex. les roches d'origine détritiques, roches d'origine chimiques, ...) .Ce sont des roches qui résultent de la compaction et de la cimentation de boues, de sables, de graviers ou de fossiles. *Selon le mode de formation des roches sédimentaires on distingue :*

- **Roches sédimentaires détritiques**: Roches qui proviennent de l'érosion de roches préexistantes continentales (roches plutoniques, roches volcaniques, roches métamorphiques). Ex. Argilite, grès, conglomérat.

- **Roches sédimentaires chimiques et biochimiques**: Roches qui résultent de la précipitation d'une solution chimique ou de l'accumulation de débris de squelette d'organisme (fossiles) et de la transformation de matière végétale. Ex. Calcaire, dolomie, gypse, charbon

❖ **Roches endogènes** (formées, au moins en partie en profondeur, à des pressions et températures supérieures à celles de la surface de l'écorce terrestre):

- **Roches magmatiques / roches Ignées / roches de Feu / roches Eruptives** (formées par la cristallisation / solidification du magma):

○ **Roches plutoniques [intrusives]:** Elles ont cristallisé au sein de la lithosphère. Se forment à partir d'un magma qui refroidit lentement à de grandes profondeurs (30 à 35 km) sous la croûte terrestre. En conséquence, les cristaux ont le temps de bien se former et la roche présente une texture grenue. Ex. Granite, gabbro ;

○ **Roches volcaniques [extrusives /effusives]:** Elles se sont épanchées en surface. Sont issues d'un magma qui refroidit rapidement à la surface de la croûte terrestre. En conséquence, les cristaux n'ont pas le temps de bien se former et la roche est à grain très fin. Ex. Basalte, rhyolite, andésite ;

○ **Roches hydrothermales :** Formées à partir de gaz ou de solutions à haute température, en relation avec des magmas ;

• **Roches métamorphiques/roches Transformées** (recristallisation de roches existantes, par suite d'élévations de pression et température le plus souvent liées à l'enfouissement), *métamorphisme* (<http://www.lunecelste.com/pages/repertoires-des-termes-en-mineralogie/lettre-r/roche.html>).

Une **roche métamorphique** est une roche formée par la recristallisation (et généralement la déformation) de roches sédimentaires ou de roches magmatiques sous l'effet de la température et de la pression qui augmentent avec la profondeur dans la croûte terrestre. Les roches métamorphiques peuvent se former également au contact de roches plutoniques et de roches sédimentaires. Ex. Gneiss, paragneiss (**Togola, 2013**).

Références bibliographiques

Ait Malek H., et El Bchari F. 2020 - Initiation aux cartes et aux coupes géologiques. Géologie générale. Manuel de travaux pratiques de Géologie. Filière science de la vie. Faculté Polydisciplinaire de Safi. Université Cadi Ayyad – Marrakech – Maroc. 24p.

Assoma T. V., 2014 - Initiation à la cartographie géologique – GMP /Support de cours de TP/. UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières. Groupe GSI. Pole Polytechnique. Côte d'Ivoire.

Baddari K., Djeddi M. 2002- Les séismes et leur prévision. Office des Publications Universitaires. 354p.

Bardintzeff J. M., 2017- Volcanologie - Préface de Yann Arthus-Bertrand - Editions L'Harmattan, Paris. France. 180 pages.

Bargach K., 2019 - Cartographie. Profil topographique. Module «Géologie générale». Filière SV/GGA TP/S1. Département BCG [Biologie-Chimie-Géologie]. Faculté Polydisciplinaire de Taza, Université Sidi Mohamed Ben Abdallah. Maroc. 15p.

Barrell J., 1914- Dictionnaires et Encyclopédies sur 'Academic'. ACADIMIC. http://encyclopédie_universelle.fr/academic.com/26740/asth%C3%A9re

Belhaded F., 2010- Travaux pratiques de géologie – série : Cartographie. Cartes et coupes topographiques. Faculté des sciences, Département des sciences de la terre. Université Mohamed V – Agdal. Rabat. 1-12pp.

Bengt R., 2014 – Cartographie - Chapitre 1 - Article / Communication. Cartes & Géomatique >n° 221 CFCN° 221.13 - 21pp.

Billet G., et Bonnefoy B., 2007- Biodiversité et Crises biologiques - Les crises biologiques. Muséum national d'histoire naturelle. Paris.

Bougeois L., 2014- Les roches magmatiques. ST3-Polytech'Paris UPMC. Sorbonne- Universités. 5P.

Bourque P. A., 2004- Planète Terre par Pierre. Département de géologie et de génie géologique. Université Laval Québec, Canada.

http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/intro.pt/planete_terre.html

Brahic, A., Hoffert, M., Schaaf, A. et Tardy, M., 1999- Sciences de la Terre et de l'Univers. Vuibert, Paris, 634 p.

Brusseaux G., 2000- Roches et minéraux - Échelle MOHS - Géopix. Institut des Sciences de la Terre de Paris (ISTeP), Université Pierre et Marie Curie, Paris.

Canadian Geographic., 2012 - La société géographique royale du Canada 20142. Cartographie 101. Index des cartes Glossaire. Canada.

Campy M., Macaire J.J., et Grosbois C., 2003- Géologie de la surface. Érosion, transfert et stockage dans les environnements continentaux. 3e édition. Dunod, Paris, . ISBN 978-2-10-057649-4 .122p.

Chabou M.C., 2017- Introduction aux Sciences de la Terre et de l'Univers - Cours de Pétrographie Endogène. 2ème année – LMD Géosciences. Département des Sciences de la Terre- Institut d'Architecture et des Sciences de la Terre. Université Ferhat Abbas, Sétif.

Dercourt J., et Paquet J., 2002 - Géologie – Objets et méthodes. 11^e Édition. Dunod, Paris. ISBN 210 0065500. 82-328 pp.

Denys C., 2002- La fossilisation : une exception conjoncturelle, In Pour la science. n°292. Revue *Mammalia*, dirige le Laboratoire des mammifères et des oiseaux du Muséum national d'histoire naturelle. 112 pages.

Djerrab R., 2017- Cours de GÉOLOGIE-Géologie générale. 1^{ère} année SNV – Université de Guelma. Algérie. 45p.

Dominique R., 2012- La viscosité des magmas et des laves, article publié sur le site de la Société Amicale des Géologues Amateurs et disponible à l'adresse :

http://www.sagageol.asso.fr/Volcanisme_page_exposes_viscosite_magmas_laves.html.

Driss F., 2010- Eléments de cour de Géologie - Chapitre 6 .Géochronologie. Département des Sciences de la Terre, Faculté des Sciences, Université Mohammed V – Agdal- Rabat-3p.

Dubois M., 2006- Minéralogie – Pétrographie cours, Travaux Dirigés et Travaux Pratiques, Université de Lille 1. France.

Emmanuel L., De Rafélist M., et Pasco A., 2007- MAXI FICHES / Géologie. ISBN 978-2-10-050168-7. Édition. Dunod, Paris, .102 p.

Foucault A., et J.F. Raoult J.F., 2005- Dictionnaire de Géologie" - 6^{ème} édition - DUNOD. ISBN 978-2-10-049071-4 ,400 p.

Frédéric B., 2012- Eléments de Sédimentologie et de Pétrologie sédimentaire... Département de Géologie, Faculté des Sciences, Université de Liège. Belgique.

Gaudin S., 1996 - Quelques éléments de géologie - Cycle d'évolution d'une roche - BTSA Gestion forestière. Châteaufarine formation. CFPPA/CFAA de Châteaufarine, Besançon .France .7p.

Gilli É., Mangan C., et Mudry J., 2004- Hydrogéologie – Objets, méthodes, applications. Édition. Dunod, Paris, . ISBN 210 0070347. 21 p.

Graine T. Kh., 2018 – Cours géologie. SNV/LMD. Revu 2017/2018 - Dpt Géologie - FSTGAT/USTHB. 3p.

Hacini M., et Tabal M. A., 2020 -

Généralité sur la géologie: La Terre dans l'Univers, Géodynamique interne, Tectonique.

Amazon Media EU. 162 pages.

Houti F. B., 2012 - Les minéraux et les roches – Chapitre 2. Dépôt institutionnel de l'Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen. 10p.

Houti F. B., 2012 - Notions sur la tectonique – Chapitre 4. Dépôt institutionnel de l'Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen. 38p.

Houti F. B., 2012 - Notions sur la géodynamique –

Chapitre 3. Dépôt institutionnel de l'Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen. 1-17 pp.

Ibrahima S., 2010 - Introduction à la structure faillée. La recherche en sciences humaines. Département de Géographie, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Sénégal.

I. f. é., 2021 - Coupe géologique. GÉOSCIENCES. École normale supérieure de Lyon. Institut français de l'Éducation - ACCES19. Lyon. France.

Jacques M., Pierre V., et Yves M., 2016 - Tectonique - 4e éd. Dunod, 2016 ISBN. 210075663X, 9782100756636. Longueur 256 pages.

Jault D., Brito D., Cardin Ph., et Nataf H. C., 2010 - *Géophysique - Le moteur de la dynamo terrestre*. Laboratoire de géophysique interne et tectonophysique (LGIT). CNRS, Université Joseph Fourier. Grenoble.

Junge C. E., 1963 - Sulfur in the atmosphere journal of geophysical science. Volume 68, Issue 13. 3975-3976 pp.

Khalidi A. Y., 2016 - Cours N5 Module de géologie 1L. TCSNV Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie Université de Djelfa.

Milnithouk V. S et Arbadji M. S., 1989 - Géologie générale. Édition. Nedra, Moscou, 1989. ISBN 5-247-00844-8. 244-247 pp.

Morarech M. et Fadli D., 2015 - Introduction aux Sciences de la Terre. Chapitre 1. Département des Sciences de la Terre. Faculté des Sciences. Université Mohammed V - Rabat - Maroc.

Moyen J. F., 2009 - Géologie structurale. Licence STE – S5. Département de Géologie, Faculté des Sciences et techniques du Saint-Étienne, Université Jean Monnet - Saint-Étienne, France. 81-85 pp.

Nabed A. N., 2020 - Cartographie. Chapitre 1: Notions générales. Spécialité: L3 Ecologie et Environnement. Université Hassiba Benbouali de Chlef – UHBC. Algérie.

Nicollet C., 2014- Origine et Evolution de la croute continentale. LMV. Université Blaise- Pascal, Clermont-Ferrand. France. 4p.

Pomerol C., Lagabrielle Y., et Renard M., 2006- Éléments de Géologie. 13^e Édition. Dunod, Paris. ISBN 210 048658 6. 158-297pp.

Pierre B., 2021- Cours de Géologie générale. GLQ-1100 pour les étudiants au premier cycle des génies civil, géologique et des mines à l'École Polytechnique de Montréal. Canada.

Pierre T., 2008 - Un gisement d'hydrocarbures vu de l'intérieur et un trésor du patrimoine géologique français : la mine de bitume de Dallet (Puy de Dôme), dite « Mine des Rois » Article | 10/06/2008 Laboratoire de Sciences de la Terre / ENS Lyon. France. 1-19pp.

Simon A., 2013- Les minéraux et les roches et les roches pour tous pour tous. Québec Mines pour tous. Ressources naturelles Québec. Canada. 42p.

Sorel D. et Vergely P., 1999- Initiation aux cartes et aux coupes géologiques. Dunod, Paris, 1999. ISBN 978-2-10-048423 .8-10 pp.

Tanguy J., 2007- Initiation à la Géologie. Volume 1. Preamble à l'étude des roches et des minéraux. Club CPN des Sittelles . Connaître et Protéger la Nature . La Tullaye . 42 boulevard des Pas enchantés 44230 Saint-Sébastien-sur-Loire. <http://cpn.sittelles.free.fr>

Togola N., 2013- Les minéraux et les roches. Québec Mines pour tous. Ressources naturelles – Québec Canada. 1-58pp.

Sites utiles à consulter

- <http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s1/plan.section.1.html>
La dynamique interne de la Terre.
- <http://www.maxicours.com/se/fiche/5/1/399151.html>
Cours de Physique-chimie-Les ondes dans la matière
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Roche_volcanique
Roche volcanique, article modifié le 11 Novembre 2015 sur Wikipédia.
- <http://www.geowiki.fr/index.php?title=Roche>
Encyclopédie participative dédiée à la géologie et aux Sciences de la Terre.
- <http://planet-terre.ens-lyon.fr/article/histoire-tectonique-plaques.xml>
Histoire de la théorie de la tectonique des plaques.
- http://aemq.org/FR/NOTIONS_GEOLOGIE/
Notions de base en géologie
- <http://www.geologie-info.com/geologie.php>
Quelques mots sur la géologie...
- http://moodle.insatoulouse.fr/file.php/301/content/geologie/7_cartographie.pdf
Glossaire Cours géologie.com 2014. Le coin des géologues. CARTETOPOGRAPHIQUE.
- <http://www.objectif-terre.unil.ch>
Cours complets sur la géologie, dans tous les domaines (avec figures et vidéos), proposé par l'Université de Lausanne (Suisse) :
- <https://www.youtube.com/watch?v=aczITBR7IRs>
Vidéos sur les différents types de volcan

