

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Echahid Hamma Lakhdar –El-Oued

Faculté de Technologie

Département d'Hydraulique, Travaux publics et de Génie civil

Cours du module

Géologie

Destiné aux étudiants en 2ème Année ST

Filières: «Hydraulique, Génie Civil et Travaux Public et »

Par ZAIR Nadjat

Maitre de conférences A

À l'Université Echahid Hamma Lakhdar –El-Oued

Année universitaire 2022-2023

Avant-propos

Le présent cours est destiné aux étudiants de deuxième année tronc commun Science et technologies Filières : «Génie Civil, Travaux Public et Hydraulique».

La géologie a pour objectif la reconstitution de l'histoire de la terre depuis ces origines jusqu'à nos jours par le biais de l'étude des matériaux constitutifs accessibles à l'observation.

L'objectif premier de l'ouvrage est d'offrir une synthèse scientifique et méthodologique de la géologie, en se basant sur les connaissances et les compétences acquises.

Il présente, des définitions et des rappels sur la Géologie. À l'issue du module, les étudiants auront acquis une bonne connaissance sur la formation de la terre et sa structure interne, l'ensemble des processus qui affectent la surface de la Terre. Ils auront également acquis les notions de bases sur les roches, les minéraux et certains phénomènes physiques comme les séismes et les volcans. Par cet ouvrage de synthèse, nous espérons enrichir la bibliographie mise à la disposition des étudiants de l'hydraulique tant à l'université d'El-Oued qu'aux autres établissements universitaires.

ZAIR Nadjat

Mai 2023

Table des matiers	page
Introduction générale	1
Chapitre I	
Introduction à la géologie	
1. Définition - Objets (sujets, thèmes) de la géologie	4
1.1. Buts de la géologie	4
1.2. Les principales disciplines (ou spécialités)	5
1.3. Méthodes d'étude et différentes échelles d'observation en géologie	6
2. Aperçu sur la paléontologie - Relation avec la stratigraphie	7
2.1. Définitions	7
2.2. Qu'est-ce qu'un fossile ?	8
2.3. Les conditions de fossilisation	8
2.4. Quelles sont les parties des organismes qui sont susceptibles d'être fossilisées et sous quelle forme ?	8
3. Divisions géologiques et structure interne de la terre	9
3.1. Divisions géologiques	10
3.2. La structure interne de la Terre	11
3.2.1. Données sismologiques	12
3.2.2. Sismologie et structure interne de la Terre : ondes P et S	13
3.2.3. Discontinuités, limites et enveloppes de la Terre	14
3.2.4. Récapitulation : la structure interne de la Terre	18
4 .Conclusion	19
Chapitre II	
Les minéraux et les roches	
1. Les minéraux	21
1.1. Définition d'un minéral	21
1.2. Critères de reconnaissance des minéraux	21
1.3. Classification des minéraux	22
1.4. Classification par groupes	29
1.5. Classification par familles	29
1.6. Les propriétés des minéraux et leur utilisation	29
2. Les roches	30
2.1. Le cycle des roches	30
2.2. Les roches magmatiques	31
2.2.1. Définition	31
2.2.2. Texture des roches magmatiques	32
2.2.3. Modes de mise en place des roches magmatiques	33
2.2.4. Différents types de magmas	33
2.2.5. Classification des roches magmatiques	34
2.2. Les roches sédimentaires	35
2.2.1. Introduction	35
2.2.2. Processus de sédimentation	35
2.2.3. Principales roches sédimentaires	36

2.3. Les roches métamorphiques	39
2.3.1. Introduction	39
2.3.2. Degrés du métamorphisme	39
2.3.3. Facteurs de métamorphisme	40
2.3.3.1. Augmentation de la température	40
2.3.3.2. Augmentation de la pression	41
2.3.4. Les types de métamorphisme	41
2.3.5. Série des roches métamorphiques	44
2.3.6. Classification des roches métamorphiques	44
2.4. Conclusion	46

Chapitre III

Action des différents éléments sur les roches

1. Introduction	48
2. Action de l'air sur les roches : (action du vent)	48
3. Action de l'eau sur les roches	49
3.1. L'eau participe à une désagrégation mécanique des roches	50
3.2. L'eau, un agent chimique d'altération	50
• L'hydrolyse	50
• Action des acides organiques	53
• Oxydation et hydratation	53
• Décarbonatation	53
• Dissolution	54
4. Les glaciers	55
4.1. Érosion glaciaire	56
5. Conclusion	57

Chapitre IV

Notion de géodynamique

1. Introduction	59
2. Géodynamique interne	59
2.1. Séismes	59
2.1.1. Introduction	59
2.1.2. Cause du séisme	59
2.1.3. Effets et intensité des séismes	60
2.1.4. Enregistrement des tremblements de terre	61
2.1.5. Localisation d'un tremblement de terre à la surface de la planète?	62
2.1.6. Séisme en Algérie	62
2.1.7. La prévention contre les effets des séismes	64
2.1.8. Tsunami et raz marée : catastrophe consécutive a un séisme	65
2.2. Volcans	67
2.2.1. Structure et reliefs	68
2.2.2. Les formes des émissions volcaniques	70
2.2.3. Déroulement classique d'une éruption	71
2.2.4 La prévention contre le volcan	71
2.2.5. Conclusion	71

3. Géodynamique externe	71
3.1. L'altération superficielle	71
3.1.1. Introduction	72
3.1.2. Les processus de l'altération	73
2.1.3. Action de la pesanteur	75
3.2. Glissement de terrain	76
3.2.3. Caractéristiques et particularités des glissements	77
3.2.4. Cause des glissements	77
3.2.5. Traitement des glissements	80
3.2.6 Les type des mouvements	80
3.2.6.1. Les glissements au sens strict	80
3.2.6.2. Le fauchage	81
3.2.6.3. Les chutes de blocs et écroulements de masses rocheuses	81
3.2.6. 4. Les coulées de boue	81
3.2.6.7. Les affaissements et effondrement	81
a)Évolution naturelle	82
b) Impact des actions humaines	83
3.2.7. La prévision	83
3.2.8. La prévention	83

Chapitre V

Adaptation des techniques géologiques aux besoins du génie civil

1. Généralité	85
1.1. Rappels topographiques	85
1.1.1. La carte topographique	85
1.1.2. Notion d'échelle	85
1.1.3. Le profil topographique	86
2. Présentation de la carte géologique	86
2.1. Définition	87
2.2. Couche géologique	90
2.3. Le plan de stratification	90
3. Principe de la construction d'une coupe géologique	91
3.1. Définitions	91
3.2. Démarche à suivre	91
3.3. Représentation des figurés	91
3.4. Structures tabulaires	91
3.4.1. Dans les régions à relief plat	91
3.4.2. Coupe Géologique d'une structure tabulaire	92
3.5. Le pendage des couches	92
3.5.1. Détermination de valeur de pendage si l'épaisseur d'une couche est indiquée avec précision	93
3.6.1. Reconnaissance des failles sur les cartes géologiques	93
3.6.2. Représentation des failles en coupe géologique	94
3.6.3. Reconnaissance des structures plissées sur une carte géologique	94
Références bibliographiques	96

	Liste des figures	Page
01	Les différentes appareilles utilisées dans la géologie	7
02	Poisson fossile	8
03	Mollusque fossilisé	9
04	Coquille de lamelibranche actuelle	9
05	Cristallisation de la calcite dans une coquille d'ammonite	9
06	Discontinuités, limites et enveloppes de la Terre	14
07	Schéma bilan de la structure interne du globe terrestre	18
08	La variation de la densité entre le noyau externe et le noyau interne	18
09	Le tétraèdre	23
10	Structure de la tridymite	25
11	Adulaire - Macle de Manebach	26
12	Orthose gemme de Benono Madagascar	26
13	Position des feldspaths dans le diagramme $KAlSi_3O_8$ - $NaAlSi_3O_8$ - $CaAl_2Si_2O_8$	26
14	AlO_4/SiO_4 tétraédrique	27
15	Les Micas	28
16	TOT ou 2:1 - Alurgite	29
17	TOT:O ou 2:1:1 - Chamosite	29
18	Le cycle des roches	31
19	Textures des roches magmatiques	32
20	Principaux modes de gisement des roches magmatiques	33
21	Degrés du métamorphisme	40
22	Influence du magma	41
23	Métamorphisme de contact	42
24	Le métamorphisme régional se produit au cœur des chaînes de Montagnes	42
25	Principales roches métamorphiques	45
26	Le mode de transport les particules par le vent	48
27	Deux structures importantes des déserts	49
28	Avancement de la dune	49
29	Champ de stabilité de deux minéraux en fonction de la concentration de la solution en ions et en acide silicique	52
30	Surface du modelé karstique « Les dolines »	54
31	Abrasion sur les flancs du glacier Perito Moreno en Argentine	56
32	Foyer et épicentre d'un séisme	60
33	Sismogramme d'un séisme	61
34	<i>La sismicité du monde</i>	63
35	Séisme de Boumerdes (Mai 2003)	63
36	Localisation des séismes en Algérie depuis 1990	64
37	Semelle sur terrain en pente	65
38	Fondation sur le bon sol	65
39	Tsunami et raz de marée	66
40	Structure et relief d'un volcan	68
41	Exemple de lave	68
42	Des fumerolles (présence de soufre dans les gaz)	69
43	Bombe volcanique sur un lit de tephras	69
44	Altération mécanique	72
45	Altération des versants	73
46	Eboulement	74
47	Loupes de glissement	75
48	Glissement de talus - Saint-Pierre- de-Chartreuse (38) 12 août 2002.	76

49	Glissement de terrain	76
50	C'est le cas du Bilan situé en rive droite de la retenue du barrage de Grand Maison dans l'Oisans, ou le grand glissement de la Clapière dans les Alpes maritimes	80
51	Coulée de boue du Plateau d'Assy (Haute-Savoie), 72 morts en 1970.	81
52	Profile topographique d'une coupe géologique	86
53	Carte géologique	87
54	Echelle stratigraphique international	89
55	Coupe géologique	90
56	Type de pendage des couches	92
57	Détermination la valeur du pendage d'après l'épaisseur d'une couche connu	93

Liste des tableaux		Page
01	Les divisions et leurs repères chronologiques	11
02	Les principaux groupes des minéraux et leurs usages	30
03	Classification des roches magmatiques	35
04	Comparaisons entre les différents types de métamorphisme	43
05	Classification des roches foliées (orientées)	45
06	Classification des roches non orientées	46

Introduction générale

Introduction

Introduction :

La **Géologie** est la science de la Terre. Elle s'intéresse particulièrement à l'écorce terrestre au travers de ses constituants, de son histoire et de son évolution. Elle comprend plusieurs domaines parmi lesquels les principaux sont la minéralogie (étude des minéraux), la paléontologie (étude des fossiles), la sédimentologie (étude des dépôts sédimentaires), la pétrologie (étude des roches), la géomorphologie (étude des formes du relief), la géochimie (étude de la chimie des roches), la tectonique (étude des déformations de l'écorce). Elle intègre aussi des domaines particuliers qui sont intimement liés aux précédents tel que la volcanologie et la séismologie, les risques environnementaux naturels et anthropiques (pollution des sols, des nappes aquifères, ...), l'hydrogéologie,

La géologie s'articule autour de trois aspects :

- Un aspect descriptif, qui conduit par exemple à la classification des minéraux, des roches et des fossiles, ou à l'établissement des cartes géologiques ;
- Un aspect phénoménologique, qui établit les propriétés des matières minérales et les phénomènes qui interviennent dans leur élaboration, leur distribution et leur transformation, ainsi que les mécanismes des changements paléogéographiques, climatiques et biologiques ;
- Un aspect historique qui retrace l'histoire de la Terre et de l'évolution de la vie.

Dans ce cours, nous allons essayer de montrer les grands traits de la géologie en quelques chapitres se rapportant au programme de la deuxième année Tronc commun technologie filières (Génie Civil, Travaux Public et Hydraulique).

Ce cours vise à la fois l'acquisition d'une connaissance adéquate des grands phénomènes qui régissent la Planète (sa dynamique, son histoire), et l'acquisition de connaissances pratiques (les matériaux, les ressources, les risques naturels), dans une perspective de formation de base en science et de développement de la culture scientifique chez l'étudiant universitaire.

Le document est organisé en cinq chapitres :

Dans le premier chapitre, on présente, des notions d'ordre général, tels que de la définition de géologie, Division de la géologie, ainsi que la structure interne de la terre. Le deuxième chapitre, définit les notions de base de la minéralogie, la présentation des différents types de roches (les roches ignées, les roches sédimentaires, les roches métamorphiques et les roches meubles), ainsi que leurs cycles de formation.

Introduction

Le troisième chapitre est consacré à la présentation de l'action des différents éléments sur les roches, à savoir : le vent, l'eau, et les glaciers. Le quatrième chapitre décrit en brefs, ainsi que les notions de la Géodynamique interne (Séismes, volcans).

Enfin, dans le cinquième chapitre nous traitons l'adaptation des techniques géologiques aux besoins du génie civil telles que la cartographies géologiques, l'emploi des constructions graphiques, levé géologique des surfaces, coupe géologique et la projection stéréographique.

Chapitre I
Introduction à la géologie

1. Définition - Objets (sujets, thèmes) de la géologie :

La géologie est une science de la Terre ou globe terrestre. Les roches et les couches sont le premier objet d'étude de la géologie.

La Terre se compose de plusieurs enveloppes. De la profondeur à la surface, sur un rayon moyen de 6370 kilomètres, on trouve : noyau, manteau (ou asthénosphère) et lithosphère qui englobe la CROUTE TERRESTRE.

La géologie s'intéresse à l'enveloppe rigide (dure) la plus externe : la LITHOSPHERE (terme à retenir) et directement accessible à l'observation. La géologie est une science d'observation.

Cette lithosphère n'est pas immuable (invariable). Elle se déforme, se casse, se plisse. On dit qu'elle évolue, qu'elle est en mouvement. La géologie étudie également cette évolution au cours des temps passés et à venir.

La géologie suscite, occasionne, un grand intérêt scientifique. De nos jours, elle s'étend à l'étude du système solaire, de notre galaxie (la Voie Lactée) et même de l'ensemble de l'Univers ou Cosmos. De ce fait la géologie se rattache aux Sciences de la Terre et de l'Univers (STU). Elle s'intéresse à l'étude des roches, des minéraux, des fossiles, mais aussi aux ressources naturelles (eaux, minerais, charbon, hydrocarbures, pierres de construction...). La géologie s'intéresse également à l'activité terrestre illustrée par les tremblements de terre ou séismes, les éruptions volcaniques, les instabilités de terrain (éboulements, glissements).

1.1. Buts de la géologie :**a. But scientifique :**

Elle s'applique à reconstituer l'âge et l'histoire de la Terre. Les travaux montrent qu'elle s'est formée il y a 4,6 milliards d'années. Sa surface était constituée de magmas (roches fondues + gaz). Leur température diminuait peu à peu ; ce qui permit, la formation de la première croûte

terrestre. Le dégazage des magmas (gaz carbonique, oxygène et autres) vont contribuer à la formation de l'atmosphère.

La découverte du concept (idée) de la tectonique des plaques qui montre que les continents portés par des plaques lithosphériques sont en mouvement, est un résultat scientifique majeur.

Elle explique la position des régions géographiques sujettes aux séismes et aux éruptions volcaniques. Elle permet d'émettre des hypothèses sur le devenir de la Terre, notamment sur l'agencement des continents dans 50 millions d'années, par exemple.

D'un point de vue biologique, la tectonique des plaques constitue le moteur principal de l'évolution du vivant. Explication : En se déplaçant, les continents se rassemblent ou se morcellent. Les côtes marines s'agrandissent ou disparaissent. Ces variations des aires marines obligent les organismes à s'adapter aux nouvelles conditions environnementales ou à disparaître dans certains cas.

b. But économique :

La géologie a aussi, un but économique. Les couches profondes sont explorées et exploitées dans le but de découvrir des ressources minérales (eau, charbon, minerais, hydrocarbures, pierres pour la construction dont des roches calcaires pour le béton, certaines roches, comme les argiles pour la médecine et la cosmétique, métaux et pierres précieuses : or, argent, diamant, opale...).

C .But technologique : la construction des ouvrages d'arts (routes, ponts, tunnels, barrages....), des villes, des usines, des ports,...nécessitent une connaissance en géologie.

D. Les risques et catastrophes naturels : les connaissances géologiques sont primordiales pour étudier et prévoir les catastrophes naturelles telles que séismes, éruptions, volcaniques, glissements de terrains, inondations.....

1.2. Les principales disciplines (ou spécialités) :

Les objets d'étude de la géologie sont variés. Pour cette raison, il existe différentes spécialités.

a. La pétrographie : Elle a pour but la description et la classification des roches (étude macroscopique). Elle est complétée et affinée par l'étude au microscope polarisant.

La volcanologie (ou vulcanologie) est une spécialité de la pétrographie.

b. La minéralogie et la cristallographie : La première s'intéresse aux minéraux (à leur chimisme. Ex : quartz ; SiO_2), la seconde à la forme des cristaux (hexagonale, photo en haut).

c. La pétrologie : Il ne s'agit pas de l'étude du pétrole (lorsque c'est le cas, on parle de géologie pétrolière ou pétrologie), mais de l'étude des roches basée sur la géochimie (chimie des roches). Dans le cas des roches magmatiques ou métamorphiques, des analyses chimiques (SiO_2 , Al_2O_3 , K_2O , Na_2O , MgO , Fe_2O_3 ...) permettent de déterminer leurs conditions de formation (Température, pression, profondeur...).

d. La sédimentologie : Elle a pour but de retrouver les mécanismes de formation des roches sédimentaires. Une roche sédimentaire est formée par accumulation des débris d'autres roches.

e. La stratigraphie : C'est l'étude des strates (ou couches) géologiques. Elle s'applique à retrouver la succession et l'âge des différentes couches.

f. La paléontologie : C'est la science des fossiles. Un fossile est un reste, une trace d'animal ou de végétal disparus, mais dont les traces sont conservées au sein des roches.

g. La tectonique ou géologie structurale : Elle étudie les déformations des couches ou terrains. Elle montre que les roches (magmatiques, métamorphiques et sédimentaires) se cassent (tectonique cassante et se plissent (tectonique souple) pendant ou après leur formation.

h. La géologie appliquée : Elle regroupe les applications pratiques de certaines branches de la géologie.

- La géologie pétrolière se base sur la stratigraphie, la micropaléontologie, la tectonique, etc.

- La métallogénie (ou gitologie ou encore géologie minière) s'intéresse à la genèse des gites minéraux et à la recherche de substances minérales utiles.

- **L'hydrogéologie :** c'est l'étude des eaux souterraines. Elle s'intéresse aux nappes d'eau emprisonnées dans des couches et des cavités. Les branches impliquées sont la pétrographie des roches sédimentaires et la stratigraphie.

- **La géologie marine :** Elle s'intéresse aux milieux marins, aux sédiments des côtes marines. Avec la paléontologie, c'est la branche qui présente le plus d'affinités avec la biologie.

- **Géologie de l'ingénieur :** c'est la branche qui s'intéresse aux propriétés physiques des roches, afin de tester leur capacité à soutenir des constructions et ouvrages d'art (ponts, barrages, routes...). Cette branche fait souvent appel à la pétrographie, la minéralogie, la tectonique, l'hydrogéologie, la géophysique (autre spécialité des Sciences de la Terre).

1.3. Méthodes d'étude et différentes échelles d'observation en géologie :

Les méthodes d'étude sont celles d'une approche scientifique classique, notamment lorsqu'il s'agit de travaux naturalistes. Ces derniers débutent par une étude générale. On dit également à grande échelle d'observation : étude d'une région, d'un gisement. Ils se poursuivent par une étude de détail, ou petite échelle d'observation : étude des roches (utilisation d'un microscope polarisant différent de celui des biologistes), des minéraux, fossiles, des eaux lorsqu'il s'agit d'hydrogéologie ou de géologie marine. 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...



Figure 1 : Les différentes appareilles utilisées dans la géologie

Les différents outils, supports et méthodes d'étude se résument comme suit :

- a. L'observation par satellites :** Elle permet d'étudier de très grandes surfaces, à l'échelle des continents. Les satellites fournissent des photos satellites.
- b. L'observation par avion :** Elle produit des photos aériennes. L'observation couvre une surface d'un millier de km².
- c. L'observation régionale :** Elle permet l'étude d'une région d'une superficie du km². C'est la plus courante en géologie. Elle se fait sur la base de cartes topographiques.
- d. L'observation à l'œil nu :** C'est l'aspect le plus courant de l'observation en Sciences de la Nature. On regarde directement les couches, les roches, les failles, les plis.
- e. L'observation à la loupe :** Elle permet d'observer le détail d'une roche, par exemple des cristaux de la taille du millimètre.
- f. L'observation au microscope :** Elle permet d'observer des éléments (cristaux par exemple), de l'ordre du dixième de millimètre.
- g. Autres appareillages :** Certains appareils comme le diffractomètre aux rayons X (RX) et le MEB (microscope optique à balayage) permettent d'étudier la structure et la composition chimique des minéraux.

2. Aperçu sur la paléontologie - Relation avec la stratigraphie

2.1. Définitions : paléontologie ; fossiles ; fossilisation

La paléontologie est la science qui étudie les restes d'organismes disparus, ou **fossiles**, ainsi que leur mode de conservation, la **fossilisation**.

Elle se trouve à la jonction de deux sciences naturelles, la géologie et la biologie.

La paléontologie est liée à la stratigraphie du fait que les fossiles contribuent à la datation (stratigraphique) des couches sédimentaires.

2.2. Qu'est-ce qu'un fossile ? On appelle fossile, des restes d'animaux et de végétaux conservés dans des roches depuis des époques lointaines. Ils se trouvent très souvent dans les roches sédimentaires. Ces restes ou fossiles comportent essentiellement : les animaux, les végétaux et des traces de vie (des pistes ; des empreintes ; des traces de nourriture ; des endroits d'habitation ; des terriers : habitats d'animaux comme les lièvres, les rats ; des déchets de défécation (coprolithe : excréments pétrifiés d'animaux). **La fossilisation** est le phénomène qui conduit à la conservation de ces restes.



Figure.2. Poisson fossile

2.3. Les conditions de fossilisation : Pour qu'un organisme se fossilise, il faut un enfouissement rapide après sa mort. C'est la condition fondamentale d'une fossilisation. Prenons le cas d'un poisson qui meurt et tombe au fond d'un lac. S'il est enseveli dans la vase qui le couvre et le protège, il présente la possibilité, des millions d'années plus tard, de devenir un fossile.

La plupart du temps, les cadavres d'animaux et les végétaux abandonnés à l'air libre ou immergés (donc : sous l'eau) ne tardent pas à pourrir et à disparaître sans laisser de traces.

Très peu d'organismes (donc des témoins du passé) arrivent jusqu'à nous. On pense que moins de 1% de la biomasse du passé nous est parvenue sous forme de fossiles.

2.4. Quelles sont les parties des organismes qui sont susceptibles d'être fossilisées et sous quelle forme ? On parle de la *conservation des fossiles*.

Ce sont les **parties dures** des organismes qui sont conservées. C'est-à-dire les squelettes lorsqu'il s'agit de vertébrés, les coquilles lorsqu'il s'agit de gastéropodes, de lamellibranches, etc. Ces restes peuvent donc être fossilisés tels quels ou être remplacés par des minéraux qui prennent exactement leur forme : c'est ainsi qu'on aura des anciennes coquilles transformées en calcite, en silice, en dolomite, en pyrite...

Les parties dures peuvent être dissoutes et laisser des empreintes ou moules dans le sédiment. Deux sortes de moules : interne et externe

Moule interne : le sédiment fin remplit une coquille de gastéropode, par exemple. Au fil des temps la coquille se dissout ; il peut rester un moule parfait des caractères internes des fossiles. *Moule externe* : Il s'agit de l'empreinte extérieure du fossile, souvent en creux.



Figure 3 : Mollusque fossilisé



Figure 4 : Coquille de lamellibranche actuelle



Figure 5 : Cristallisation de la calcite dans une coquille d'ammonite

3. Divisions géologiques et structure interne de la terre :

3.1. Divisions géologiques :

Les temps géologiques ont été découpés par les géologues en une échelle chronologique. Ainsi, l'histoire des temps fossilifères a été divisée, dès le XIXe (19) siècle, en trois ères :

- Primaire, secondaire et tertiaire;

Chacune des ères a été divisée à son tour en périodes plus courtes:

- Les systèmes ou périodes, par exemple le Crétacé, le Jurassique.

- Avec des sous-systèmes (ou séries) comme le Crétacé inférieur et le Crétacé supérieur. Les systèmes sont eux-mêmes subdivisés en étages.

Les divisions les plus importantes, ou ères, correspondent à l'apparition ou à la disparition de groupe sentiers d'organismes.

Par exemple : La limite entre le Protérozoïque et l'ère primaire (Paléozoïque), correspond à l'apparition des premiers organismes fossilisés à tests ou à coquilles minéralisés.

La fin de l'ère primaire a été marquée par la disparition de plus de 95% des espèces, dont les Trilobites. La limite entre l'ère secondaire (Mésozoïque) et l'ère tertiaire (Cénozoïque) correspond à la crise Crétacé - Tertiaire pendant laquelle plusieurs groupes, dont celui des Dinosaures, ont disparu. Chaque période géologique porte un nom qui lui a été donné au XIXe siècle par les géologues de l'Europe de l'Ouest ou de Grande-Bretagne. Par exemple, le nom de Cambrien vient de Cambria, le nom romain du Pays de Galles. Les divisions et leurs repères chronologiques, les évènements liés à l'apparition de la vie et certains évènements géologiques majeurs ont été présentées au Tableau 1.

Tableau 1 : Les divisions et leurs repères chronologiques

Phanérozoïque	Cénozoïque	Quat.	Holocène	~ 0,01	Ages absolus en Ma	
			Pléistocène	~ 2,6		
		« Tertiaire »	Néogène	Pliocène		~ 5
				Miocène		~ 23
			Paléogène	Oligocène		~ 34
				Eocène		~ 56
				Paléocène		~ 65
			Mésozoïque	Crétacé		sup. inf.
	Jurassique			sup. moy. inf.		~ 200
	Paléozoïque	Trias		sup. moy. inf.		~ 250
		Permien		sup. moy. inf.		~ 300
		Carbonifère		sup. inf.		~ 360
Dévonien		sup. moy. inf.	~ 415			
Silurien			~ 445			
Ordovicien		sup. moy. inf.	~ 490			
Cambrien		sup. moy. inf.	~ 540			
Précambrien	Protérozoïque			~ 2 500		
	Archéen			~ 4 000		
	« Hadéen »			~ 4 600		

3.2. La structure interne de la Terre :

La structure interne de la Terre désigne la répartition en enveloppes successives de l'intérieur de la Terre. Ces enveloppes, de plusieurs kilomètres d'épaisseur, ainsi que leurs limites ou surfaces de discontinuités, portent des noms spécifiques.

On a cité 3 dénominations : croûte, manteau, noyau.

Des interprétations géophysiques et géologiques vont préciser, affiner cette première subdivision. D'autres noms vont être ajoutés : croûte continentale et croûte océanique, discontinuité de Mohorovicic ou Moho, LVZ, lithosphère, manteau supérieur, asthénosphère, limite 670 km, manteau profond, discontinuité de Gutenberg, noyau liquide, discontinuité de Lehmann, noyau solide.

3.2.1. Données sismologiques :

- Les ondes sismiques :

Grâce à la sismologie et au comportement des ondes sismiques P et S, notamment par leurs vitesses de propagation qui diffèrent en fonction des milieux traversés, on peut retrouver les profondeurs des limites et discontinuités et faire des interprétations sur la nature physicochimique des enveloppes.

Les ondes P ont la caractéristique de se propager dans les milieux solides et liquides.

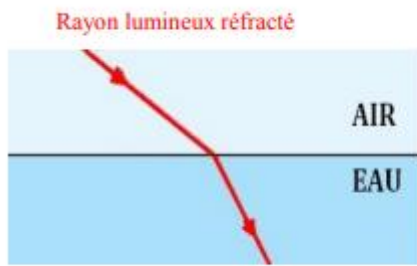
Les ondes S ne se propagent que dans les milieux solides.

Comparaison : rayons lumineux / ondes sismiques :

Les ondes sismiques sont des vibrations dont le comportement est comparable à celui des rayons lumineux. Ces derniers modifient obligatoirement leur vitesse et leur trajectoire en

Structure .En géologie, c'est la façon dont sont disposées géométriquement des couches les unes par rapport aux autres. Exemple : A gauche, les couches présentent une structure horizontale. A droite, il s'agit de couches, ou enveloppes, concentriques (se referment autour d'un centre). Passant d'un milieu à un autre, par exemple air/eau. C'est le phénomène de réflexion /réfraction.

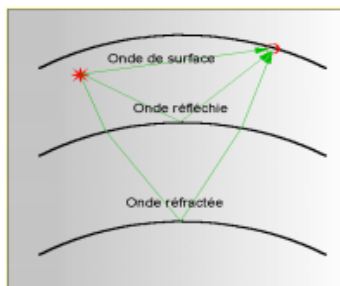
Dans le cas de la réflexion (miroir), le rayon se réfléchit selon le même angle. La figure est symétrique. Dans le cas de la réfraction, le rayon traverse la lame de verre en formant un angle plus petit à la sortie. Les rayons sont déviés, réfractés ou réfléchis à chaque changement du milieu. On dit que les indices de réfraction, représentés par la lettre « n » de ces 2 milieux, sont différents.

**Définition Indice de réfraction :**

Il s'exprime par un nombre qui caractérise la vitesse de propagation de la lumière dans le milieu concerné. Ex :

$n_{\text{air}} = 1,0003$ et $n_{\text{eau}} = 1,3329$ et

$n_{\text{quartz}} : 1,55$

Cas des ondes sismiques:

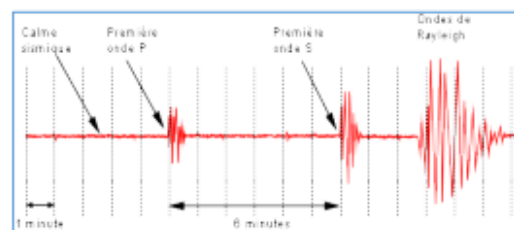
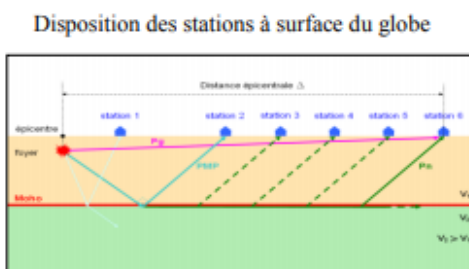
Un séisme (point rouge) émet des ondes de surface et des ondes qui pénètrent en profondeur avant de ressortir à la surface.

Les ondes de surfaces sont les « ondes L ».

Les ondes P et S sont les ondes de volume qui pénètrent en profondeur, soumises aux lois de la réflexion / réfraction (dites de Snell/Descartes). Ce sont elles qui apportent des indications sur la structure de la Terre.

3.2.2. Sismologie et structure interne de la Terre : ondes P et S :

Le cheminement des ondes P et S depuis la surface « 0 » jusqu'à « 6371 kilomètres=rayon de la Terre » permet d'étudier l'intérieur du globe. Pour cela, le dispositif est le suivant : différentes stations sismiques sont réparties à la surface du globe. Dans chaque station il existe au moins 3 sismomètres disposés de façon telle que les ondes qui leur parviennent sont enregistrées dans les 3 directions de l'espace.



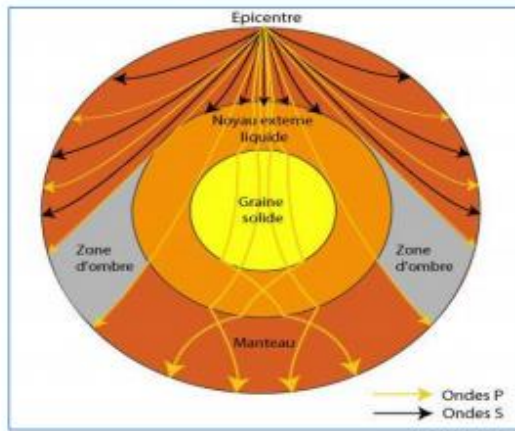
Lorsqu'un séisme a lieu, on constate que les ondes qui parviennent de n'importe quel foyer sismique donnent toujours les mêmes sismogrammes.

- La ressemblance à l'échelle du globe de tous les diagrammes, amène à déduire que

L'intérieur de la Terre possède une structure sphérique.

- La propagation et le trajet des ondes sismiques, montrent que les vitesses des ondes P et S subissent des modifications brutales (réflexion-réfraction) lorsqu'elles s'enfoncent à l'intérieur de la Terre. On en déduit que l'intérieur de la Terre n'est pas homogène.

- Certaines profondeurs sont traversées par les zones P. On conclut à l'existence de matériaux solides et /ou liquides. D'autres milieux ne sont traversés que par les ondes S, l'interprétation amène à dire que d'autres enveloppes traversées sont solides.



La sismologie met en évidence des surfaces de discontinuités et des limites montrant ainsi que la structure interne de la Terre n'est pas homogène.

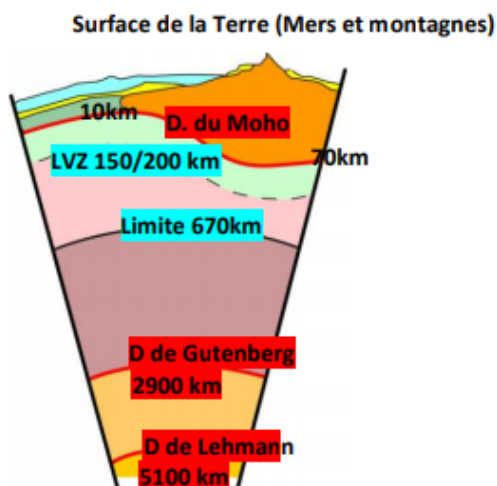
Cette hétérogénéité (contraire d'homogénéité) donne au globe une structure en enveloppes concentriques où alternent des états solides et liquides. Leur densité, leur nature pétrographique et chimique, leur température, sont également différentes d'une enveloppe à une autre.

3.2.3. Discontinuités, limites et enveloppes de la Terre :

Récapitulation : définition discontinuité et limite: Au sein de la Terre, une discontinuité est une surface imaginaire obtenue par des calculs et suite à des interprétations. Elle est repérée par des modifications brutales de la vitesse de propagation des ondes sismiques.

Elle sépare des enveloppes de nature différentes. Si la surface n'est pas nette, on parle de limites.

De la surface jusqu'au centre de la Terre qui correspond à son rayon, on distingue 3 discontinuités (D) et 2 limites.



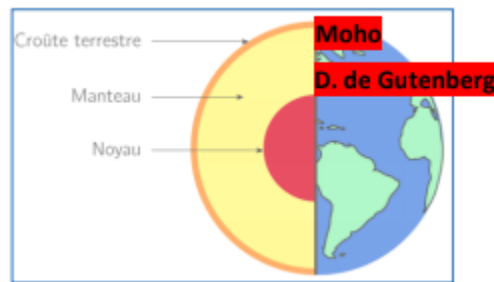
• 6371 km (Rayon = profondeur de la Terre)

A retenir
Discontinuités et limites :
3 discontinuités majeures et **2 limites**
Profondeurs en kilomètres :

- D. du Moho : de 10 à 70 km
- LVZ : 150/200 km
- Limite 670 km
- Discontinuité de Gutenberg : 2900 km
- Discontinuité de Lehmann : 5100 km

Figure 6 : Discontinuités, limites et enveloppes de la Terre

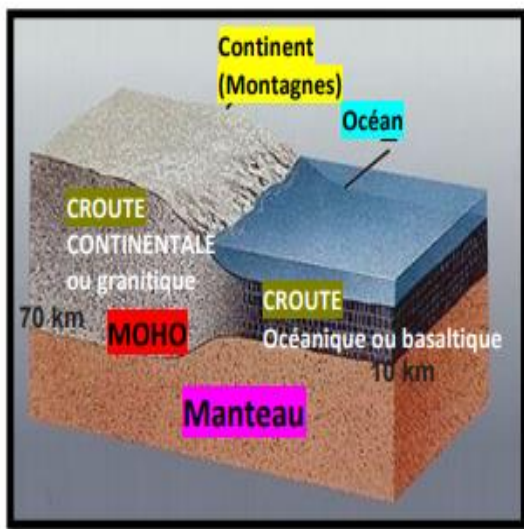
Ces discontinuités et limites vont déterminer les enveloppes. Les subdivisions en croûte, manteau et noyau vont être affinées.



a. La Discontinuité de Mohorovicic ou MOHO et la CROUTE TERRESTRE : Cette discontinuité a été détectée par Mohorovicic (1909, Croatie) qui lui donna son nom et abrégée Moho. Les ondes P, ont sur les premiers kilomètres qu'on précisera plus bas, une vitesse de 7 km/s.

La Moho est variable (comme la montre la carte du globe) : Sous les continents il est à 70 km (en moyenne) de profondeur. Sous les océans et les mers, il se trouve à 10 km (en moyenne).

Au sein de la Terre le Moho délimite une première enveloppe : la croûte terrestre qui affleure à la surface de la Terre. Elle est rigide (dure). On distingue 2 types de croûtes dont la nature pétrographique des roches et la densité sont très différentes. (Voir encadré) ;



Croûte terrestre : croûte continentale + croûte océanique : Rigide.
Profondeur du Moho sous les continents : 70 km (en moyenne) 1- Croûte continentale : granitique. Densité d : 2,65 (plus légère que la croûte océanique).
Sous les océans : Moho à 10 km (en moyenne). 2- Croûte océanique : basaltique, densité d : 2,90

La discontinuité du Moho est majeure : elle sépare la croûte terrestre du manteau terrestre.

Sous le Moho débute le Manteau terrestre dans lequel on distingue deux limites, la LVZ et la limite « 670 km ».

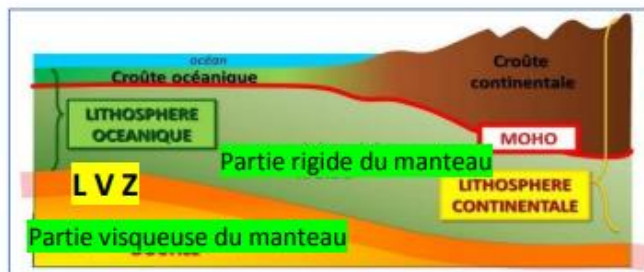
b .La Low Velocity Zone (LVZ) et la LITHOSPHERE :

- **La lithosphère est une enveloppe solide :**

En quittant la croûte terrestre, en descendant un peu dans le manteau, les ondes P traversent une enveloppe encore rigide, mais formée de roches appelées péridotites dans lesquelles la vitesse et la densité augmentent.

Arrivées à une profondeur de 150-200 km à partir de la surface, les ondes marquent une légère diminution de leur vitesse. Il ne s'agit pas d'une discontinuité, mais comme son nom

l'indique, d'une « zone » (une bande), qui indique une limite dénommée en anglais : Low Velocity Zone ou LVZ, en français : zone à faible vitesse.



LITHOSPHERE : Assemblage de la croûte terrestre + partie rigide du Manteau (péridotites).

Comme pour les croûtes on peut distinguer une lithosphère océanique et une lithosphère continentale.

(Retenir seulement lithosphère)

Cette partie rigide du manteau est ajoutée à la croûte terrestre, elle-aussi rigide pour former la LITHOSPHERE ou MANTEAU LITHOSPHERIQUE. On parle également de MANTEAU PERIDOTITIQUE (car formées de roches : péridotites).

c. Limite 670 km : Asthénosphère ou manteau supérieur :

- **L'asthénosphère est une enveloppe liquide :**

Au-delà de la LVZ, les matériaux deviennent liquides (on dit aussi visqueux), jusqu'à une limite située à 670 km (arrondie parfois à 700 km). Cette enveloppe du manteau, située entre la LVZ et la limite 670 km, est dénommée ASTHENOSPHERE ou manteau supérieur.

De ce fait la lithosphère rigide se trouve sur une asthénosphère visqueuse. On verra que cette structure est en relation étroite avec le modèle de la Tectonique des Plaques.

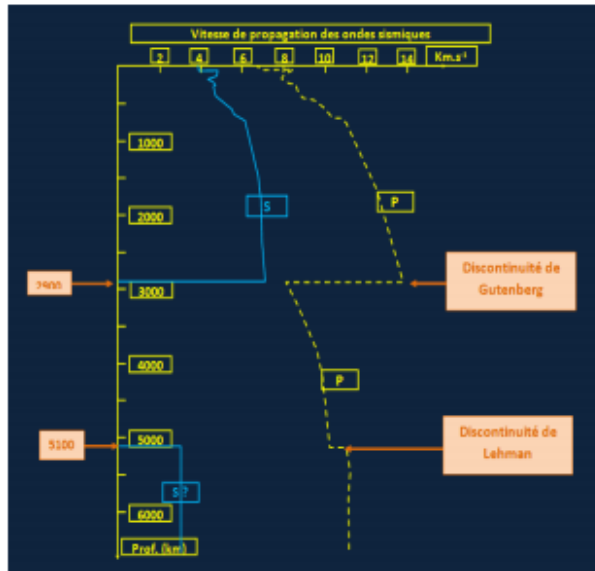
- **Le manteau profond est une enveloppe solide :**

L'enveloppe située entre la limite 670 km et la discontinuité de Gutenberg, qui marque la fin du manteau, est nommée manteau profond ou barysphère. On pense que sa nature est solide.

d. La discontinuité de Gutenberg et le noyau « entier » :

Le comportement des ondes est donné par des graphes (hodographes), ci-dessous :

La courbe bleue exprime les vitesses des ondes S ; la courbe jaune, les vitesses des P.



Interprétation : Les courbes ne sont pas continues. Elles sont saccadées, **discontinues**, varient brutalement à mesure qu'elles s'enfoncent.

A 2900 km, les courbes reviennent en arrière. Il y a diminution des vitesses V_p et V_s (de près de 14 km/s, elles redescendent à environ 7 km/s pour V_p et de 6 km/s à 0 km/s pour V_s).

Il s'agit de la mise en évidence de la **discontinuité de Gutenberg** qui marque, par ailleurs, un saut énorme de la température qui passe de 2200 °C à 3450 °C. Idem pour la densité (autre diagramme, voir plus bas).

Sur ce graphe, les profondeurs sont portées en ordonnées (« verticales ») et varient de 0 à 6370 kilomètres (on arrondit le nombre 6371). Les vitesses des ondes P et S sont en abscisses (« horizontales ») exprimées en km par seconde (km.s⁻¹).

La discontinuité de Gutenberg représente la discontinuité majeure de la Terre. Elle marque le passage du manteau au noyau terrestre.

e. La discontinuité de Lehmann : subdivision noyau externe / noyau interne :

La discontinuité de Lehmann met en évidence que le noyau se compose de 2 parties. Sur le graphe, on remarque qu'entre 2900 et 5100 km, les ondes S ne traversent pas cette enveloppe.

Par contre, elle est traversée par les ondes P. On en déduit que le noyau possède une partie supérieure ou externe qui est liquide et un noyau interne solide.

- **Le noyau externe est une enveloppe liquide :**

Il se compose de fer et sa densité est de l'ordre de 9.

Les ondes S, entre 5100 km et le centre de la Terre, traversent à nouveau une enveloppe qui est solide. Il s'agit du noyau interne dénommé : graine.

- **Le noyau interne est une enveloppe solide :**

Il se compose de fer et de nickel et sa densité est de l'ordre de 12.

3.2.4. Récapitulation : la structure interne de la Terre :

La Terre possède une structure interne dans laquelle alternent des enveloppes solides et liquides dont la densité augmente de la surface vers la profondeur.

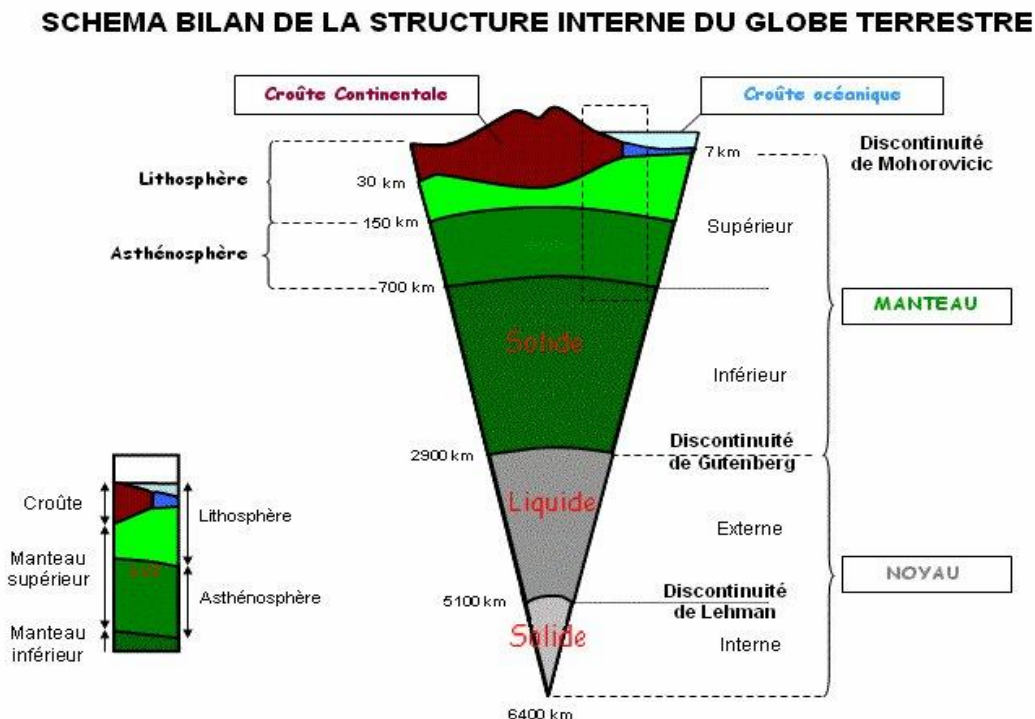


Figure 7 : Schéma bilan de la structure interne du globe terrestre

Sur ce schéma (imprimé, de préférence) compléter avec toutes les indications (vitesses des ondes, densité des matériaux, nature pétrographique, nature du matériau (solide ou liquide) cités dans ce cours. Figure complémentaire montrant la variation de la densité entre le noyau externe et le noyau interne.

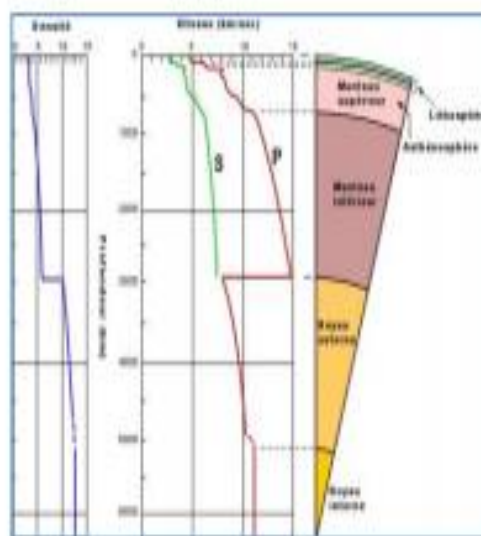


Figure 8 : La variation de la densité entre le noyau externe et le noyau interne

4 .Conclusion

La géologie est une science interprétative dont l'objectif est de reconstituer l'état initial de l'objet étudié et son histoire, à partir de l'étude de l'état final observé. Ce chapitre est une introduction générale à la géologie. Il définit la Paléontologie, l'origine de la terre et la division de la geologie. La structure interne de la Terre est également présentée.

Cette dernière est répartie en plusieurs enveloppes successives, dont les principales sont la croûte terrestre, le manteau et le noyau. Cette représentation est très simplifiée puisque ces enveloppes peuvent être elles-mêmes décomposées.

Chapitre II
Les minéraux et les roches

1. Les minéraux :

La Terre est constituée de roches, les roches sont formées de minéraux et les minéraux sont constitués d'un ou plusieurs éléments chimiques. Ainsi, le granite est une **roche** composée de trois minéraux principaux : quartz, feldspaths et micas. Le quartz est un minéral de formule chimique SiO_2 : il est composé de silicium et d'oxygène.

1.1. Définition d'un minéral :

Un **minéral** est un solide naturel, homogène, possédant une composition chimique définie et une structure atomique ordonnée.

La structure atomique ordonnée veut dire que tous les minéraux sont des cristaux : c'est-à-dire des solides possédant une forme polyédrique limitée par des faces planes (dans le cas où la formation du cristal n'a pas été perturbée par des agents externes).

La science qui s'occupe de l'étude des minéraux est : **la minéralogie**.

Exemple : l'eau **liquide** n'est pas un minéral, mais la glace d'eau qui est solide, naturelle, homogène, possédant une composition chimique définie (H_2O) et une structure atomique ordonnée (la glace d'eau est cristallisée) est un **minéral**.

1.2. Critères de reconnaissance des minéraux :

- **La densité :**

La densité est un critère important pour déterminer un minéral. On distingue les minéraux légers, de densité 1 à 2, moyennement lourds, de densité 2 à 4, lourds, de densité 4 à 6 et très lourds, de densité supérieure à 6. La plus forte densité est celle des métaux, tels que l'or (15 à 16) ou le platine (14 à 20). La plupart des minéraux ont une densité de 2 à 4.

Exemple : l'or et la phlogopite sont deux minéraux qui se ressemblent. Cependant, la densité de l'or est de 15 tandis que celle de la phlogopite est de 2-3.

- **La couleur :**

Pour certains minéraux, la couleur peut-être un critère de détermination. Mais beaucoup de minéraux présentent des tons et même des couleurs très différents.

Exemple : l'olivine possède une couleur verte caractéristique (d'où son nom).

- **La couleur de la trace (le trait) :**

La couleur de la trace (ou **couleur de la poudre** ou **couleur du trait**) des minéraux est la couleur que laisse la trace ou la poudre d'un minéral lorsqu'on le frotte sur une surface blanche. La couleur de la poudre des minéraux peut être différente de la couleur du minéral.

Exemple : la pyrite (FeS_2) de couleur jaune a une trace noir verdâtre.

- **L'éclat :**

L'éclat est la propriété du minéral de réfléchir la lumière. On distingue plusieurs types d'éclats, parmi les plus importants :

- l'éclat métallique : fort éclat des métaux (or, cuivre, argent)
- l'éclat vitreux : c'est un éclat qui rappelle le verre (le quartz)
- l'éclat gras : la surface du minéral semble induite d'une couche d'huile l'éclat terreux : minéral qui n'ont pas d'éclat (ils ont une apparence terreuse).
- Exemple certaines argiles.

- **La transparence :**

C'est la propriété des minéraux de laisser passer la lumière. D'après le degré de transparence, on distingue :

- Minéraux transparents : on peut voir clairement un objet à travers et on peut lire l'écriture au travers du minéral.
- Minéraux translucides : le minéral est traversé par la lumière même sous une forte épaisseur, sans que l'on puisse toutefois distinguer un objet à travers.
- Minéraux non transparents et minéraux opaques : ne laissent pas passer la lumière.

- **La forme du minéral :**

Cubique - forme cubique.

Octaédrique - forme d'un octaèdre.

Tabulaire - forme rectangulaire;

- **Le clivage :**

Le clivage est la propriété d'un minéral de se briser selon des plans parallèles bien définis. Ces plans sont appelés: plans de clivage.

- **La dureté :**

C'est la résistance d'un minéral à la rayure. Un minéral est dit plus dur qu'autre, s'il raye ce dernier. Les duretés sont classées par rapport à celles de 10 minéraux tests (échelle de Mohs).

1.3. Classification des minéraux :

Dans la classification des minéraux, on distingue les **non-silicates**, qui ne contiennent pas de silicium et qui sont peu abondants, mais qui sont très importants du point de vue économique étant donné que la plupart des métaux et éléments chimiques sont extraits de ces minéraux, et les **silicates**, qui sont les plus abondants et entrent dans la composition d'une grande partie des

roches, mais ne sont pas intéressants du point de vue économique.

Le principe de base de la classification des minéraux est de grouper les espèces minérales en classes en fonction de la nature des **radicaux anioniques** présents. On distingue ainsi les 8 classes suivantes:

1. Les éléments natifs : L'élément se combine à lui-même; exemples : l'or (Au), le diamant (C), le platine (Pt).

2. Sulfures : Dans les sulfures, le soufre est combiné avec un ou plusieurs métaux; exemples : galène PbS, blende ZnS, pyrite FeS₂.

3. Oxydes et hydroxydes : Dans les oxydes, l'oxygène est combiné avec un ou plusieurs métaux; exemples : magnétite Fe₃O₄, hématite Fe₂O₃. Les hydroxydes contiennent le radical OH⁻; exemple : gibbsite Al(OH)₃.

4. Les carbonates : Les carbonates contiennent le radical (CO₃)²⁻, exemple : calcite CaCO₃.

5. Les sulfates : Les sulfates contiennent le radical (SO₄)²⁻; exemple : barytine BaSO₄.

6. Les phosphates : Les phosphates contiennent le radical (PO₄)³⁻; exemple : l'apatite Ca₅(PO₄)₃(OH, F, Cl).

7. Les silicates : Les silicates sont des minéraux caractérisés par le tétraèdre (SiO₄)⁴⁻, comportant un atome Si au centre, et des atomes O aux quatre sommets (figure.9).

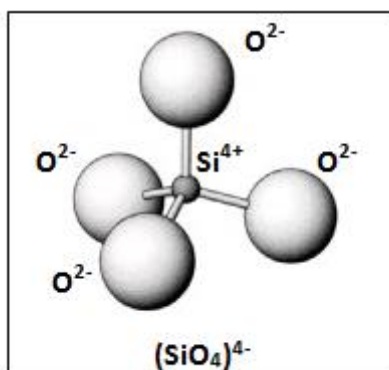


Figure 9 : Le tétraèdre

Les silicates constituent environ 92% en poids de la totalité des minéraux formant la croûte terrestre, d'où leur extrême importance.

8 Halogénures : Les halogénures incluent les chlorures dans lesquels le chlore est généralement combiné à un métal (exemple : halite NaCl) et les fluorures dans lesquels le fluor est combiné avec un ou plusieurs métaux (exemple : fluorine CaF₂).

- a) **Les tectosilicates** : Les **tectosilicates** sont des minéraux du groupe des silicates définissent un sous-groupe où le type d'architecture, correspond à une polymérisation maximale ; architecture à charpente tridimensionnelle ; le rapport Si/O est égal à 0,5.

Les tectosilicates sont des minéraux formés par association de motifs élémentaires tétraédriques ($[\text{SiO}_4]^{4-}$) par tous leurs sommets. En fait les tétraèdres (polyèdres qui ont 4 faces, 6 côtés et 4 sommets) de base $[\text{SiO}_4]^{4-}$ que l'on retrouve dans tous les silicates, sont ici soudés par leurs quatre sommets et chaque oxygène est lié à deux cations.

➤ **Types de tectosilicates :**

Les tectosilicates comprennent plusieurs minéraux parmi les plus importants de l'écorce terrestre.

Si on part du tétraèdre $[\text{SiO}_4]^{4-}$ et qu'on mette en commun chaque oxygène entre deux tétraèdres, on obtient la formule de la silice, SiO_2 , qui dans la nature se présente en différents polymorphes (quartz, tridymite, cristobalite etc.) et est le constituant principal du verre.

On peut dériver la formule chimique des autres tectosilicates à partir de celle de la silice, généralisée en $n\text{TO}_2$, où T indique le cation tétraédrique, essentiellement du silicium ou de l'aluminium. La charge négative, qui résulte du remplacement du silicium par l'aluminium dans les tétraèdres, est compensée par la présence des cations M (K, Na, Ca, Ba, Li...) dans les cavités de la structure. Cette caractéristique est commune aux feldspaths, aux feldspathoïdes et aux zéolithes, mais la topologie est différente dans les trois cas.

b) Groupe de Quartz (figure 10) :

Tridymite : La **tridymite** est une espèce minérale de la famille des tectosilicates, et un des polymorphes de la silice, avec le quartz, la cristobalite, de Formule SiO_2 pouvant contenir des traces : Ti;Al;Fe;Mn;Mg;Ca;Na;K;H₂O.

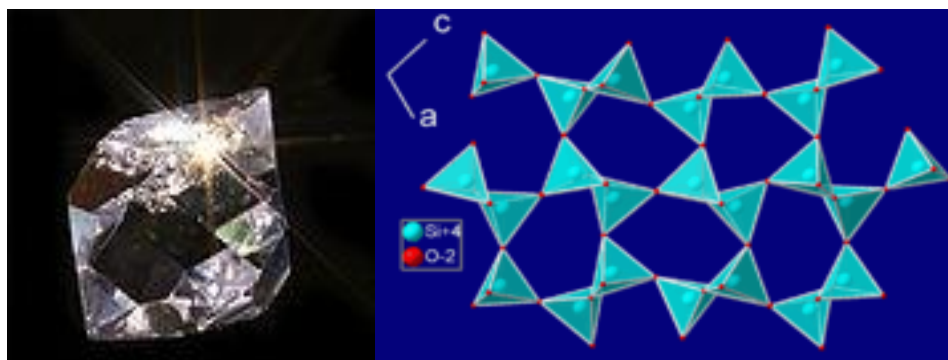


Figure 10 : Structure de la tridymite

Il s'agit de la phase hexagonale de la silice, stable à température intermédiaire entre le quartz et la cristobalite. Sa structure est constituée de couches de tétraèdres orientés alternativement dans les deux sens de l'axe sénéaire (axe cristallographie c). Chaque couche est reliée à deux autres couches, supérieure et inférieure, à former une structure tridimensionnelle. Dans la structure on peut reconnaître des canaux formés par des hexagones de tétraèdres, plus ou moins déformés. Cristobalite, Kéatite, Coésite, Stishovite.

c) Groupe des feldspathoïdes :

$n = 2$, MT_2O_4 , à structure quartz ou tridymite ;

$n = 3$, MT_3O_6 , à structure cristobalite ;

Les **feldspathoïdes** sont des minéraux anhydres appartenant à la famille des tectosilicates et chimiquement proches des feldspaths. La structure est plus ouverte de celle des feldspaths et les cations (sodium, potassium, calcium ...) occupent des cavités généralement plus grandes que celles des feldspaths, cavités qui forment des canaux dans lesquels des ions peuvent entrer et sortir et où de petites molécules peuvent circuler sans détruire la structure. Certains magmas sont si riches en silice qu'ils forment des roches riches en quartz (roche acides). D'autres magmas ont juste ce qu'il faut de silice pour former des silicates, principalement des feldspaths, mais pas assez pour former du quartz. D'autres ont encore moins de silice et ne peuvent pas former de feldspaths : ils forment alors des feldspathoïdes, qui contiennent seulement environ les 2/3 de la silice présente dans les feldspaths alcalins. Évidemment la coexistence feldspathoïdes – quartz dans le système $Na_2O - Al_2O_3 - SiO_2$ n'est pas possible : s'il y a assez de silice pour former des feldspaths, minéraux très stables et de composition intermédiaire entre les feldspathoïdes et le quartz, on n'observe pas de feldspathoïdes.

➤ **Groupe des feldspaths** : $n = 4$, MT_4O_8

Un feldspath est un minéral à base de silicate double d'aluminium, de potassium, de sodium ou de calcium. Les feldspaths sont de la famille des tectosilicates. Il existe de nombreux feldspaths dont les principaux sont l'orthoclase, potassique, l'albite, sodique, et l'anorthite, calcique. Le mélange de ces deux derniers donne la série des plagioclases. On peut distinguer les feldspaths alcalins, souvent translucides, blanchâtres ou roses et riches en alcalins (Na^+ , K^+), des plagioclases qui diffèrent des précédents par la présence de calcium (Ca^{2+}), et l'absence de potassium (K^+). Les feldspaths forment le plus important groupe de minéraux de la croûte terrestre. Ils sont hautement cristallisés et ont la propriété de former des macles et de rayer le verre. En combinaison avec d'autres minéraux les feldspaths potassiques (ou alcalins ou orthoses) composent des roches plutôt acides, telles les syénites et les granites (grenues) ou les trachytes et les rhyolites (microlithiques). Les feldspaths plagioclases, composent quant à eux, pour ce qui concerne les roches grenues, les diorites, les gabbros, plus rarement les tonalités et parfois les syénites. Lorsque l'on en retrouve dans les roches microlithiques, il s'agit la plupart du temps d'andésites ou de basaltes (figure 11, 12 et 13).



Figure 11: Adulaire - Macle de Manebach

Figure 12 : Orthose gemme de Benono Madagascar

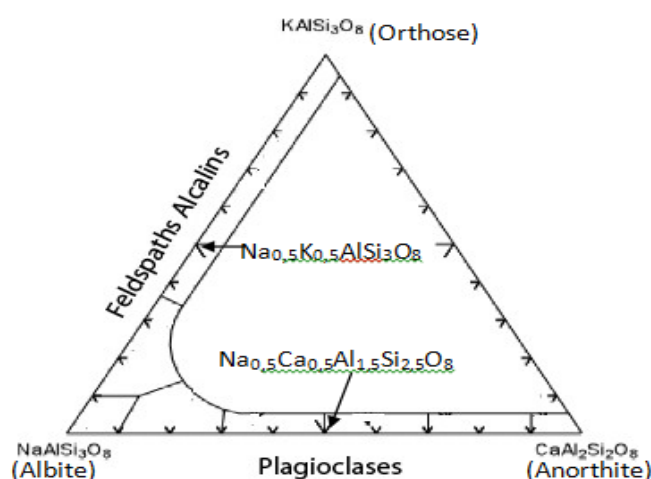


Figure 13 : Position des feldspaths dans le diagramme $KAlSi_3O_8$ - $NaAlSi_3O_8$ - $CaAl_2Si_2O_8$

d) Groupe des zéolithes - $n > 4$ (Figure 6) :

Une **zéolithe**, ou **zéolite** est un minéral microporeux appartenant au groupe des silicates, sous-groupe des tectosilicates dans lequel il forment une famille comprenant des aluminosilicates hydratés de métaux des groupes IA et IIA du tableau périodique des éléments, tels le calcium, le magnésium et le potassium.

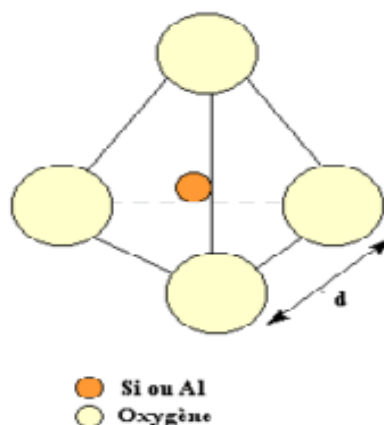


Figure 14 : $\text{AlO}_4/\text{SiO}_4$ tétraédrique

Les zéolithes sont des polymères inorganiques cristallins structurellement complexes, basés sur une suite indéfinie tridimensionnelle de structures quadri-connectées de AlO_4 et de SiO_4 tétraédriques, liées entre elles par un échange d'ions oxygène (oxyde). Chaque AlO_4 tétraédrique présent dans la structure apporte une forte charge négative qui est contrebalancée par un ou plusieurs cations, tels Ca^{2+} , Mg^{2+} ou K^+ (figure 14).

- **Origine** : Les zéolithes peuvent être naturelles ou synthétiques. Plus de 150 types de zéolithes ont été synthétisées et 48 zéolithes naturelles sont connues. Les zéolithes naturelles se forment sur des terrains où les roches et les cendres volcaniques ont réagi avec les eaux souterraines alcalines et aussi dans les couches de dépôts organiques des bassins superficiels. Cette formation dure plusieurs centaines ou milliers d'années. Les zéolithes naturelles sont très rarement pures car elles sont généralement contaminées à divers degrés par d'autres minéraux métalliques, du quartz ou d'autres zéolithes. Pour cette :

Natrolite - $\text{Na}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Chabazite-Ca - $\text{CaAl}_2\text{Si}_4\text{O}_{12} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

Heulandite-Ca - $\text{CaAl}_2\text{Si}_7\text{O}_{18} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

e) Les Phyllosilicates : Les **Phyllosilicates**, sont des minéraux du groupe des silicates construits par empilement de couches tétraédriques (« T ») où les tétraèdres partagent trois sommets sur quatre (les oxygènes « basaux »), le quatrième sommet (l'oxygène « apical ») étant reliée à une couche octaédrique (« O ») occupé par des cations différents (Al, Mg, Fe, Ti, Li, etc.).

L'union des couches T et des couches O forme des feuillets, qui représentent l'unité de clivage des phyllosilicates. Dans la couche T, l'aluminium peut se substituer au silicium, auquel cas la charge négative du groupement est plus élevée ; exemple les micas (figure 15).

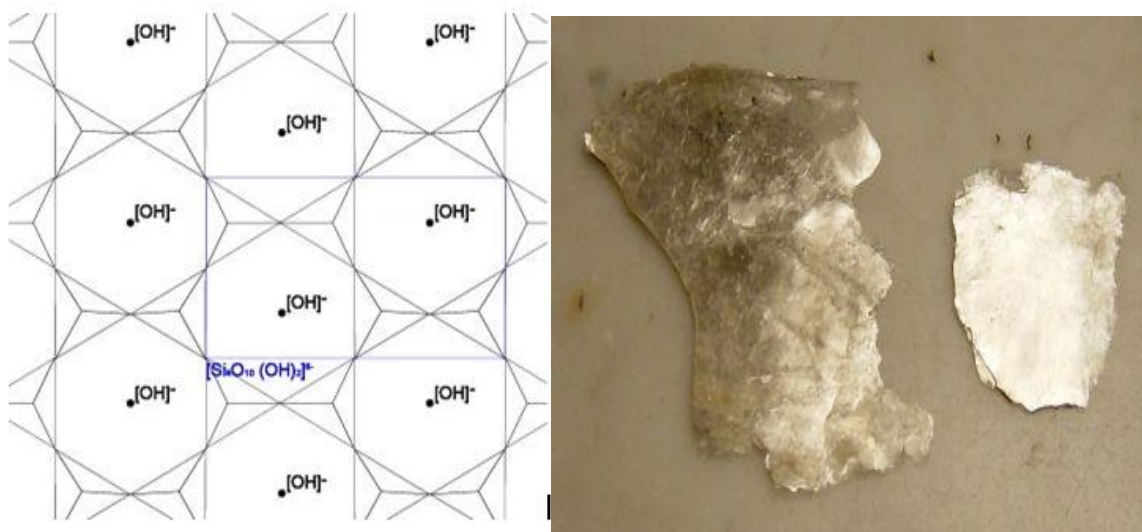


Figure 15 : Les Micas

Selon le type de feuillet, les phyllosilicates sont classés dans les groupes suivants (figure 16 et 17) :

- *Phyllosilicates TO ou 1 : 1*,
- *Phyllosilicates TO ou 1 : 1*,
 - où le feuillet est formée d'une couche T et d'une couche O, l'épaisseur de le feuillet étant environ 7Å : groupe de la kaolinite-serpentine ;
- *Phyllosilicates TOT ou 2 : 1*,
 - où le feuillet est formée de deux couches T dans les deux côtés d'une couche O, l'épaisseur de le feuillet étant environ 10Å : groupe talc-mica-montmorillonite dont de nombreux minéraux sont les principaux constituants des argiles ;
- *Phyllosilicates TOT:O ou 2 : 1 : 1*,
 - où le feuillet est formé de trois couches TOT et une autre couche O isolé, l'épaisseur du feuillet étant environ 14Å : groupe des chlorites.

Les phyllosilicates sont classés en deux groupes et trois familles sur la base de l'occupation des trois sites octaédriques indépendants dans la maille primitive.



Figure 16 : TOT ou 2:1 - Alurgite

Figure 17 : TOT:O ou 2:1:1 - Chamosite

1.4. Classification par groupes :

Selon que les trois sites cationiques sont occupés par des cations, ou seulement deux sur trois, on distingue deux groupes de phyllosilicates : les **trioctaédriques** et les **dioctaédriques**.

La couche O isolé forme aussi des minéraux, et notamment des hydroxydes : la brucite, $\text{Mg}(\text{OH})_2$, trioctaédrique, et la gibbsite, $\text{Al}(\text{OH})_3$, dioctaédrique.

La formule chimique idéale des minéraux les plus représentatifs est obtenue en partant de celle du couche tétraédrique - $[\text{Si}_n\text{O}_{4n}]^{4n-}$ et de celle du couche trioctaédrique - $\text{Mg}_3(\text{OH})_6$ ou dioctaédrique $\text{Al}_2(\text{OH})_6$ en remplaçant une partie des hydroxyles par des oxygènes apicaux.

1.5. Classification par familles :

Les trois sites octaédriques peuvent être partiellement ou totalement équivalents en termes de leur occupation et dimension. Ce critère mène à une classification plus détaillée, en trois familles :

- **Famille homo-octaédrique** : les trois sites octaédriques sont tous équivalents (contiennent le même cation ou mélange de cations et ont une dimension égale ou très proche) ;
- **Famille méso-octaédrique** : deux des trois sites octaédriques sont équivalents, tandis que le troisième se différencie pour son occupation et/ou dimension ;
- **Famille homo-hétéro-octaédrique** : les trois sites octaédriques sont tous différents.

La classification par familles est plus précise que celle par groupes. En fait, les phyllosilicates présentent souvent une occupation intermédiaire entre 2 et 3 (un site partiellement occupé, les deux autres complètement occupés) : la classification par groupes devient alors approximative, tandis que celle par famille couvre tous les cas.

1.6. Les propriétés des minéraux et leur utilisation :

Le tableau 2 montre les minéraux les plus communs dans les principaux groupes et leurs usages.

Tableau 2 : Les principaux groupes des minéraux et leurs usages

GRUPE	MINERAL	FORMULE	USAGES
Eléments natifs	Or	Au	Echanges, joaillerie
	Argent	Ag	Joaillerie, photographie
	Cuivre	Cu	Conduction électrique
	Diamant	C	Gemme, joaillerie, abrasifs
	Graphite	C	Mines crayons, lubrifiants
	Soufre	S	Produits chimiques, médicaments
	Platine	Pt	Alliages, catalyseurs
Oxydes	Hématite	Fe_2O_3	Mineral de fer
	Magnétite	Fe_3O_4	Mineral de fer
	Corindon	Al_2O_3	Gemme, abrasif
Sulfures	Galène	PbS	Mineral de plomb
	Sphalérite	ZnS	Mineral de zinc
	Pyrite	FeS_2	« or des fous »
	Chalcopyrite	$CuFeS_2$	Mineral de cuivre
	Bornite	Cu_5FeS_4	Mineral de cuivre
	Cinnabre	HgS	Mineral de mercure
Sulfates	Gypse	$CaSO_4 \cdot H_2O$	Plâtre et placo-plâtre (panneaux)
	Anhydrite	$CaSO_4$	Plâtre et placo-plâtre (panneaux)
	Baryte	$BaSO_4$	Boue de forage
Carbonates	Calcite	$CaCO_3$	Ciment Portland
	Dolomite	$CaMg(CO_3)_2$	Ciment Portland
	Malachite	$Cu_2(OH)_2CO_3$	Mineral de cuivre, joaillerie
	Azurite	$Cu_2(OH)_2(CO_3)_2$	Mineral de cuivre, joaillerie
	Rhodocrosite	$MnCO_3$	Joaillerie
Silicates	Quartz	SiO_2	Verres, horlogerie, calculatrices
	Talc	$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$	Poudre pour bébé
	Amiante	$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$	Isolant
	Kaolinite	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	Céramiques
Halogénures	Halite	NaCl	Sel commun
	Fluorite	CaF_2	Fabrication des aciers
	Sylvite	KCl	Fertilisant (agriculture)
Hydroxydes	Uimonite	$FeO(OH) \cdot nH_2O$	Mineral de fer, pigment
	Bauxite	$Al(OH)_3 \cdot nH_2O$	Mineral d'aluminium

2. Les roches :

2.1. Le cycle des roches :

C'est un matériau qui entre dans la constitution de l'écorce terrestre quel que soit ses propriétés et son aspect physique. Une roche correspond à un agencement de minéraux les uns par rapport aux autres selon les lois de la cristallographie. Chaque roche a une architecture, une forme, les dimensions et une disposition particulière. On distingue 03 types des roches:

- **les roches magmatiques**, formées par la cristallisation du magma ;
- **les roches sédimentaires** qui proviennent de l'accumulation et la consolidation de sédiments ;
- Et enfin **les roches métamorphiques** qui résultent des transformations que subissent les roches lorsqu'elles sont soumises à des conditions de température

et/ou de pression différentes de celles qui étaient présentes lors de la formation de la roche.

Trois grands types de roches forment la croûte terrestre. La figure 18 présente ces trois grands types, ainsi que les processus qui conduisent à leur formation. Ainsi présenté, il véhicule l'idée de la cyclicité des processus.

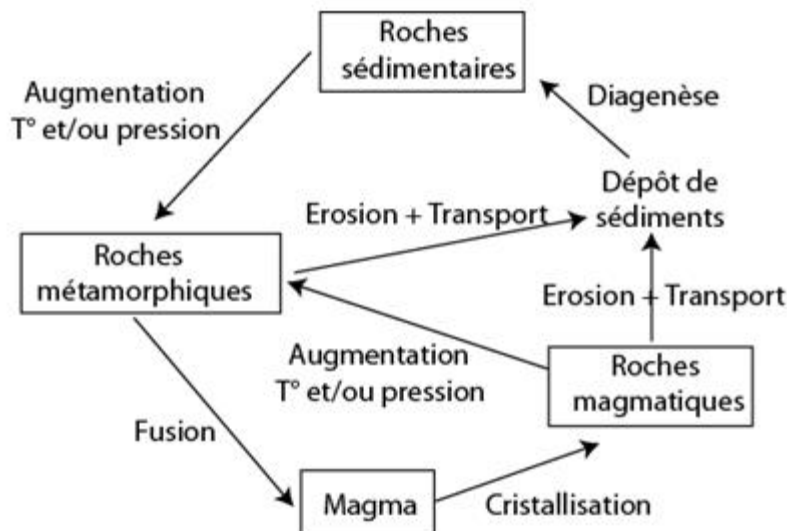


Figure 18 : Le cycle des roches

2.2. Les roches magmatiques :

2.2.1. Définition :

Les roches **magmatiques** résultent de la solidification (cristallisation, refroidissement) d'un **magma**. Le magma est un bain silicaté fondu, constitué d'une phase liquide (la plus importante), d'une phase solide (cristaux) et d'une phase gazeuse (0,1- 3%).

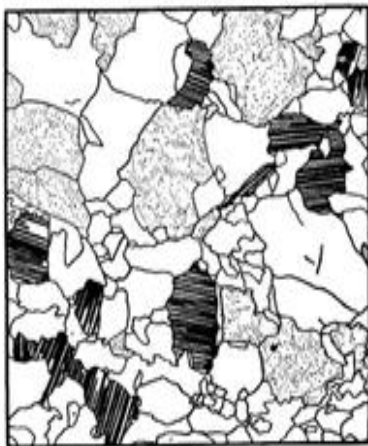
Selon le mode de refroidissement du magma, on distingue deux types de roches magmatiques :

- Les roches plutoniques : formées par le refroidissement lent du magma en profondeur. Le magma aura le temps de bien cristalliser, et la roche possédera de gros minéraux visibles à l'œil nu.
- Les roches volcaniques, formées par le refroidissement rapide du magma en surface. Les minéraux n'auront pas le temps de bien cristalliser. Les roches volcaniques sont donc caractérisées par la présence de minéraux invisibles à l'œil nu.

2.2.2. Texture des roches magmatiques :

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 (figure 19) :

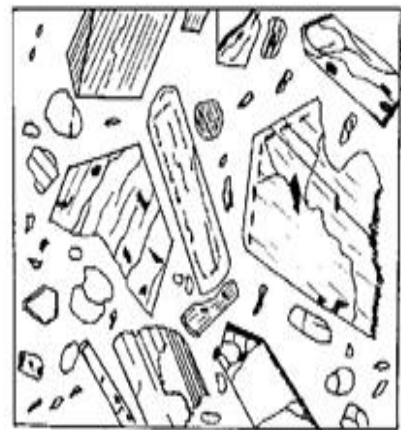
- Texture **grenue (ou phanéritique)** : concerne les roches magmatiques dont les minéraux sont visibles à l'œil nu (de grandes tailles). C'est le cas des roches plutoniques.
- Texture **microlithiques (ou aphanitique)** : concerne les roches magmatiques qui ne montrent pas de cristaux visibles à l'œil nu. C'est le cas des roches volcaniques.
- Texture **vitreuse** : 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).



Texture grenue



Texture microlithique



Texture porphyrique

Figure 19 : Textures des roches magmatiques

2.2.3. Modes de mise en place des roches magmatiques (figure 20) :

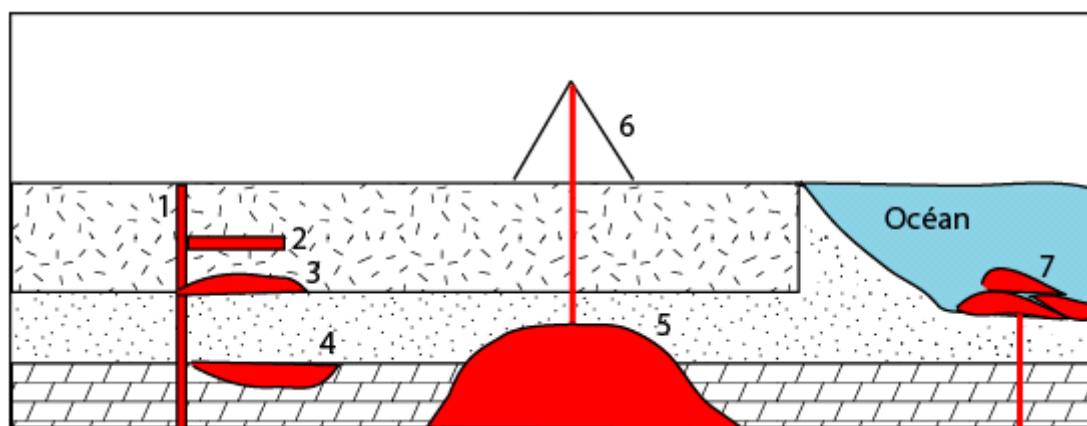


Figure 20 : Principaux modes de gisement des roches magmatiques

- 1 : dyke** : la roche magmatique recoupe les roches encaissantes.
- 2 : sill** : la roche magmatique est parallèle aux roches encaissantes (concordantes).
- 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.

2.2.4. Différents types de magmas :

Les types de magmas sont déterminés par leurs compositions chimiques, températures, teneurs en gaz et viscosité (résistance à l'écoulement). Ainsi, on distingue trois grands types de magmas :

- 1- Les magmas basiques ou basaltiques** : 45-55 % SiO_2 , riche en Fe, Mg, Ca, pauvre en K, Na. La température de ces magmas : 1000 – 1200°C. Pauvres en gaz et peu visqueux.
- 2- Les magmas intermédiaires ou andésitiques** : 55-65 % SiO_2 , intermédiaire en Fe, Mg, Ca, K, Na. La température de ces magmas : 800 – 1000°C. Teneurs en gaz et viscosité intermédiaire.
- 3- Les magmas acides ou rhyolitiques** : 65-75 % SiO_2 , pauvre en Fe, Mg, Ca, riche en K, Na. La température de ces magmas : 600 – 800°C. Riches en gaz et très visqueux.

Environ 80% des magmas émis par les volcans sont basaltiques, et les magmas andésitiques et

rhyolitiques représentent ~10% chacun du total.

Remarques

- Durant les 2 premiers milliards d'années qui ont suivi la naissance de la Terre existaient des magmas plus chauds qui ont donnée naissance à des roches appelées **Komatiites**. La température de ces magmas est estimée entre 1400 et 1600°C. Ces magmas contenaient moins de 45% de SiO₂ et sont appelés : magmas **ultrabasiques**. Les magmas ultrabasiques n'existent plus aujourd'hui à la surface de la Terre.
- Signalons aussi l'existence d'une lave très rare de faible température (lave qui a la température la plus basse connue, 500°C) : la **carbonatite** (lave alcaline très riche en calcium). Un seul volcan actif émet actuellement des carbonatites : le Lengai, en Tanzanie.
- Différence entre magma et lave : la lave est le liquide séparé du gaz (magma dégazé).

2.2.5. Classification des roches magmatiques :

Une classification simplifiée des roches magmatiques est basée sur la texture (roche volcanique ou plutonique), la composition chimique et la minéralogie (Tableau 3).

En ce qui concerne la composition chimique, les roches magmatiques sont essentiellement composées d'oxygène et de silicium (ces deux éléments forment plus de 70% de la composition chimique des roches magmatiques) exprimées sous forme de pourcentage en silice (SiO₂). On distingue ainsi :

- i. Les roches acides : SiO₂ > 65 %. Exemple : granite.
- ii. Les roches intermédiaires : 52 % < SiO₂ < 65 %. Exemple : andésite.
- iii. Les roches basiques : 45 % < SiO₂ < 52 %. Exemple : basalte.
- iv. Les roches ultrabasiques : SiO₂ < 45 %. Exemple : péridotite.

En ce qui concerne la minéralogie, les roches magmatiques sont surtout composées de quartz, feldspaths (alcalins et plagioclases), olivine, pyroxènes, amphiboles et micas.

Tableau 3 : Classification des roches magmatiques

Texture		Acide	Intermédiaire	Basique	Ultrabasique
	Plutonique	Granite	Diorite	Gabbro	Péridotite
	Volcanique	Rhyolite	Andésite	Basalte	
	Vitreuse	Obsidienne			
	Minéraux présents				
	Quartz	Plagioclase Na-Ca	Plagioclase Ca	Pyroxène	
	Feldspaths alcalin	Amphibole	Pyroxène	Olivine	
	Micas				

2.2. Les roches sédimentaires :

2.2.1. Introduction :

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 précipitation chimique.

Elles se forment sur la surface de la terre, ou au fond des eaux et résultent de l'action des agents d'érosions et du transport et de l'activité des êtres vivants ou des phénomènes purement physiques ou chimiques se sont donc les roches Exogènes.

2.2.2. Processus de sédimentation :

La formation des roches sédimentaire passe par plusieurs étapes :

- **L'altération superficielle :** (Stade de Les processus de l'altération superficielle de la roche mère sont de trois types biologiques.

Les processus mécaniques (ou physiques) sont ceux qui désagrègent mécaniquement la roche, comme l'action du gel et du ouvre progressivement ces dernières. L'action mécanique des racines des arbres ouvre aussi les fractures.

Altération mécanique (pluie, variation de température gel et dégel), Existence de fissures + eau + gel + dégel donne éclatement de la roche ;

L'altération chimique est très importante : plusieurs silicates, comme les feldspaths, souvent abondants dans les roches ignées, sont facilement attaqués par les eaux de pluies et transformés en minéraux des argiles (phyllo silicates) pour former des boues. Modification de la composition chimique (cristallographie) ;

Certains organismes ont la possibilité d'attaquer biochimiquement les minéraux. Vont chercher dans les minéraux les éléments chimiques dont ils ont besoin.

L'action combinée de ces trois mécanismes produit des particules de toutes tailles. C'est là le point de départ du processus général de la sédimentation.

- **Le transport :**

Outre le vent et la glace, c'est surtout l'eau qui assure le transport des particules. Selon le mode et l'énergie du transport, le sédiment résultant comportera des structures sédimentaires variées.

_ Transport par roulement

_ Transport par traction

_ Transport par saltation

_ Transport par suspension

- **La sédimentation :**

Tout le matériel transporté s'accumule dans un bassin de sédimentation, ultimement le bassin marin, pour former un dépôt. Les sédiments se déposent en couches successives dont la composition, la taille des particules, la couleur, etc., varient dans le temps selon la nature des sédiments apportés.

- **Diagenèse :**

On appelle diagenèse les transformations physiques et chimiques qu'ils subissent après leurs dépôts et qui les transforment en roches sédimentaires. La diagenèse s'accomplit à faible profondeur et à faible température, moins de 100 à 200°C, ce qui la distingue du métamorphisme. Les facteurs de la diagenèse :

_ Les êtres vivants

_ L'action de l'eau

_ Action des facteurs physiques (pression, température, mouvement tectonique)

2.2.3. Principales roches sédimentaires :

A. formation :

D'après l'origine, on distingue les roches détritiques, roches chimiques et roches organiques.

- **Les roches d'origine détritiques :**

Au bord d'une rivière ou de la mer. La roche est plus ou moins fissurée, sous l'effet du gel et dégel, les fragments tombent au pied, la rivière les enlève, les transporte et les dépose plus loin, les dépôts ainsi formés sont des sédiments. Souvent les débris sont soudés les uns aux autres par un ciment, la roche qui était meuble à l'origine, se trouve consolidée et dure.

Cinq étapes principales conduisent aux roches dures détritiques :

- 1- Elaboration sur place des fragments ;
- 2- Leurs enlèvements ou mobilisation ;
- 3- Le transport ;
- 4- Le dépôt, sous forme de sédiments meuble ;
5. La cimentation qui les transforme en roches cohérentes ;

Peuvent être meubles ou consolidées ;

Exemple : cimentation du sable (meuble) donne le Grés (consolidé) ;

- **Les roches d'origine organique**

Après la mort d'animaux ou de plantes, les parties dures ou résistantes, s'accumule et donne des roches sédimentaires.

- **Les roches d'origine chimique**

L'évaporation se produit à l'air libre dans des lagunes sur salée, l'eau s'évapore, le sel reste et se dépose.

Exemple : Diatomites (polissage),

Radiolarites (utilisé par les bijoutiers).

B. Les roches siliceuses :

Elles se forment par précipitation de la silice (SiO_2) dans des eaux saturées (origine chimique) ou par extraction de la silice de l'eau de mer par des organismes pour constituer leurs tests qui par accumulation et nitrification donneront des roches dures (origine biochimique). Ces roches sont essentiellement formées d'opale (silice hydratée) et de calcédoine. Le terme **chert** est utilisé pour désigner l'ensemble des roches siliceuses d'origine chimique ou biochimique.

Les principales roches siliceuses d'origine biochimique sont : les **radiolarites** formées par les tests de radiolaires (zooplancton marin) et les **diatomites** formées par l'accumulation de tests de diatomées (algues siliceuses).

La principale roche siliceuse d'origine chimique est le **silex**, accident siliceux en milieu calcaire. C'est une roche qui a été utilisée comme outils (flèches, haches, pour allumer le feu) par les hommes préhistoriques.

C. Roches évaporitiques (roches salines) :

Composées de chlorures ou de sulfate, les roches salines sont en grande majorité des résidus d'évaporation de l'eau de mer ou de lagunes, d'où le nom d'évaporites.

La précipitation des minéraux évaporitiques se fait, entre autres, dans les grandes lagunes en bord de mer, lagunes qui se mesurent en plusieurs dizaines ou centaines de kilomètres carrés, dans des régions où l'évaporation excède la précipitation.

Les principales roches évaporitiques sont : le **gypse** ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) et l'anhydrite (CaSO_4), le **sel gemme** ou **halite** (NaCl) et le sel de potasse ou **Sylvie** (KCl).

D. Les roches carbonatées :

Les roches carbonatées sont formées essentiellement de calcite (CaCO_3), d'aragonite (CaCO_3) ou de dolomite $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$. Les roches carbonatées riches en calcite (ou aragonite) sont appelées **calcaires**, alors que celles riches en dolomite forment les **dolomies**. Les calcaires constituent plus de 10 % des roches sédimentaires (figure 1).

L'eau de mer contient une grande quantité de carbonate de calcium (CaCO_3) dissoute. De nombreux organismes utilisent ce carbonate de calcium pour former leurs squelettes et autres parties dures de leurs corps. Quand ces organismes meurent, les courants marins brisent ces fragments en petits morceaux appelés sédiments bioclastiques. La roche formée par la lithification de ces sédiments est appelée **calcaire bioclastique**, ce qui indique que cette roche s'est formée par des processus biologique et clastique. D'autres calcaires et les dolomies résultent de la précipitation directe de carbonates (origine chimique) : **dolomies primaires**, **stalactites**, **stalagmites**, **calcaires lithographiques**, **travertins**.

Pour faire la différence entre calcaires et dolomies, on utilise le test de l'acide. Les calcaires font effervescences à l'acide (HCl), alors que les dolomies ne le font pas. En général, les dolomies contiennent toujours un certain pourcentage de calcite et vice-versa (les calcaires contiennent aussi un certain pourcentage de dolomite).

E. Roches carbonées :

Ce sont des roches formées essentiellement de carbone. Les principales roches sont les charbons (tourbe, houilles, lignite et anthracite) et les pétroles, on les appelle aussi les roches combustibles.

Les charbons (du latin carbona = charbon) désigne des roches sédimentaires stratifiées, combustibles, de couleur sombre, formées principalement de débris végétaux. On distingue plus précisément :

- la tourbe (65% de C), légère, brune, formée d'un amas de plantes enrichies en carbone.
- le lignite (70-75% de C), brun noir et terne, à débris ligneux bien reconnaissables, à pouvoir calorifique de l'ordre de 5000 kcal/kg.
- la houille ou charbon (voir figure 2.17) (85% de C), noire, mate ou brillante, tachant les doigts, bon combustible, plus au moins friable.
- l'anthracite (92-95% de C), noir, brillant, ne tachant pas les doigts, possède le pouvoir calorifique le plus élevé plus de 8000 kcal/kg.

F. Les roches ferrifères et phosphatées :

Les roches phosphatées (phosphate) sont essentiellement d'origine organique (dents et os d'animaux) et sont constituées d'apatite. Les roches ferrifères sont riches en oxydes de fer comme la bauxite (roche formée par l'altération des granites) ou le fer oolithique.

2.3. Les roches métamorphiques :

2.3.1. Introduction :

Les roches métamorphiques sont issues de la transformation de roches ignées ou sédimentaires sous l'effet de température et/ou de pressions élevées. Deux grands types de métamorphisme produisent la majorité des roches métamorphiques : le métamorphisme de contact et le métamorphisme régional. Un troisième type est plus restreint : le métamorphisme de choc.

2.3.2. Degrés du métamorphisme (grade) :

Le grade ou degré du métamorphisme est le terme utilisé pour décrire les conditions de température et de pression sous lesquelles la roche s'est formée (figure 21).

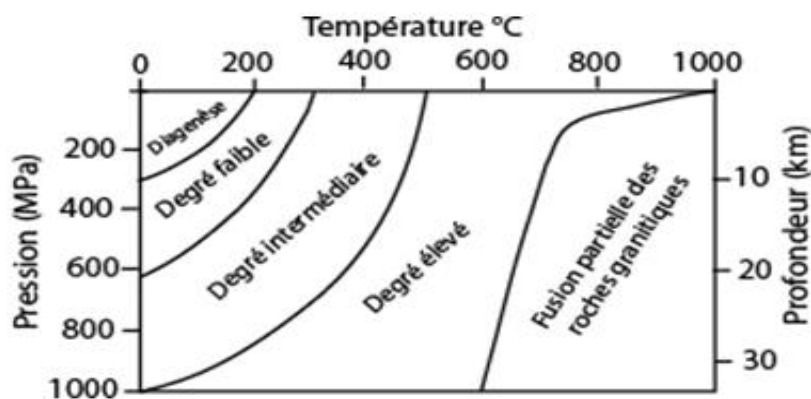


Figure 21: Degrés du métamorphisme

- Le métamorphisme de faible degré se produit à des températures situées entre 200 et 320°C, à relativement faible pression. Les roches du faible degré de métamorphisme sont caractérisées par la présence de minéraux hydratés (minéraux qui contiennent de l'eau dans leur structure cristalline) : minéraux argileux, serpentine, chlorite.
- Le métamorphisme de degré élevé se produit à des températures supérieures à 320°C à relativement forte pression. Avec l'augmentation du degré du métamorphisme, les minéraux hydratés deviennent moins hydratés en perdant H_2O , avec apparition de minéraux non hydratés quand le degré du métamorphisme devient très élevé. Exemple de minéraux faiblement hydratés et non hydratés qui caractérisent le métamorphisme de degré élevé : la muscovite, minéral hydraté qui disparaît aux degrés très élevés ; la biotite, minéral hydraté qui demeure stable à des degrés très élevés du métamorphisme ; le pyroxène, minéral non hydraté ; le grenat, minéral non hydraté.
- Lorsque les roches enregistrent une augmentation de la pression et de la température, on parle de métamorphisme **prograde**. Ce métamorphisme indique l'enfouissement de la roche.
- Lorsque les roches enregistrent une diminution de la pression et de la température, on parle de métamorphisme **rétrograde ou rétro métamorphisme**.
Ce métamorphisme indique l'exhumation de la roche.

2.3.3. Facteurs de métamorphisme :

2.3.3.1. Augmentation de la température :

Au cours d'un enfouissement sous de nouvelles couches de sédiment, les roches sont soumises à des températures de plus en plus élevées à cause du gradient géothermique (figure 22).

Lorsque le magma très chaud est introduit dans une séquence de roches froides, il y a transfert de chaleur et cuisson de la roche encaissante aux bordures. La tectonique est aussi un facteur de l'élévation de température.

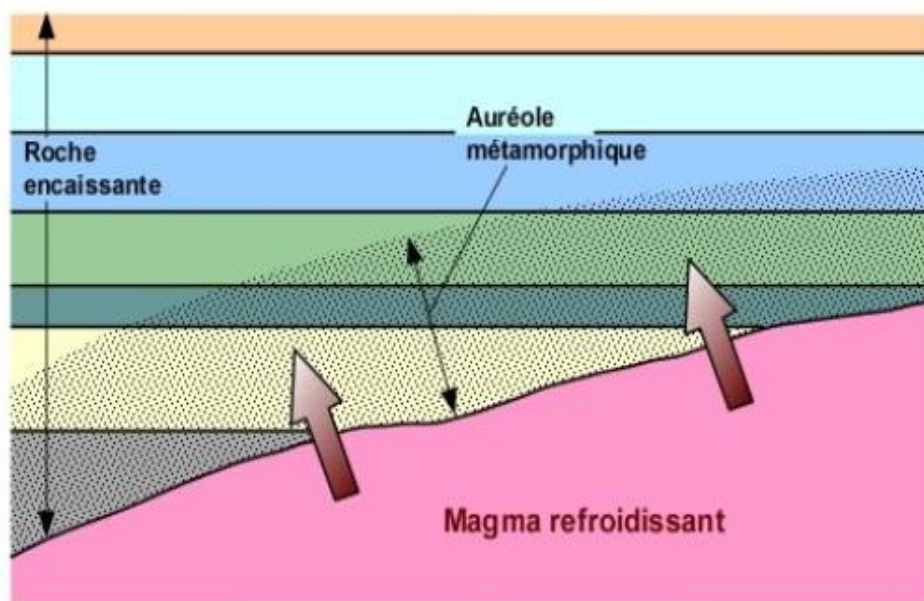


Figure 22 : Influence du magma

2.3.3.2. Augmentation de la pression :

La pression s'accroît en profondeur en même temps que la température, les pressions qu'elles subissent s'élèvent progressivement.

Le temps Se fait en temps assez long. Exemple : la craie comprimée à 600 atmosphères pendant quelques instants ne subit pas de transformation notable, mais elle se transforme en calcaire cohérent si on la maintient sous pression pendant 17 ans.

2.3.4. Les types de métamorphisme (tableau 4) :

- **Le métamorphisme de contact :**

Le métamorphisme de contact est celui qui se produit dans la roche encaissante au contact d'intrusifs. Lorsque le magma encore très chaud est introduit dans une séquence de roches froides, il y a transfert de chaleur et cuisson de la roche encaissante aux bordures (figure 23).

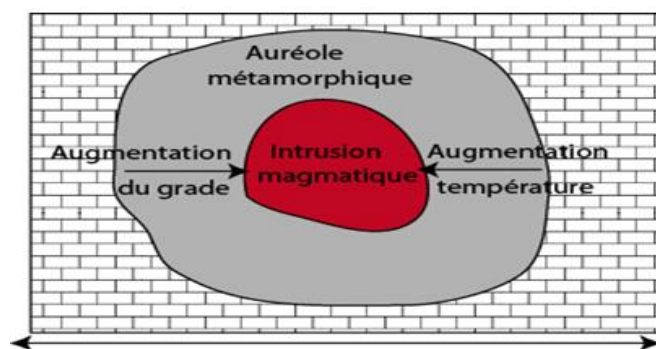


Figure 23: Métamorphisme de contact

- **Le métamorphisme de choc.**

Le métamorphisme de choc est celui produit par la chute d'une météorite à la surface de la planète. Le choc engendre des températures et des pressions énormément élevées qui transforment les minéraux de la roche choquées, des températures et des pressions qui sont bien au-delà de celles atteintes dans le métamorphisme régional.

- **Métamorphisme régional (ou général) (figure 24) :**

Le métamorphisme régional affecte de grandes superficies (plusieurs dizaines de milliers de kilomètres carrés) qui sont le siège de déformations tectoniques et contraintes orientées. Il se produit au cœur des grandes chaînes de Montagnes sous des conditions de haute

température-haute pression. Les roches métamorphiques formées sont toujours orientées et très déformées (schistes, micaschistes, gneiss).

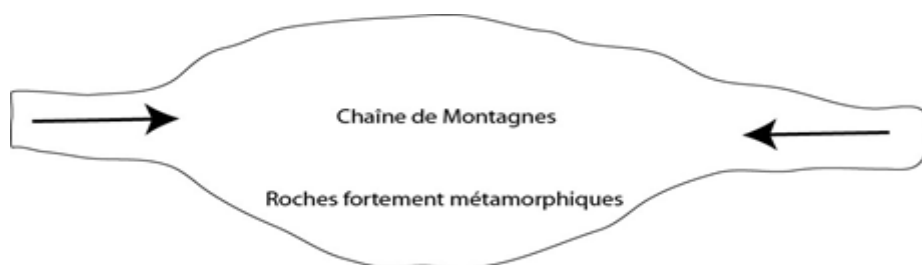


Figure 24 : Le métamorphisme régional se produit au cœur des chaînes de Montagnes

- **Métamorphisme hydrothermal :**

Il est lié à des circulations de fluides (eau) à température élevée. Ces fluides réchauffent les roches traversées et leur apportent des éléments chimiques (phénomène appelé métenosomatose). Ce type de métamorphisme se rencontre dans les régions volcaniques.

- **Métamorphisme d'enfouissement :** Ce type de métamorphisme se produit dans des bassins sédimentaires profonds à la base des séries sédimentaires épaisses de plusieurs kilomètres

lorsque la température dépasse 300°C en l'absence de contraintes orientées. Ce métamorphisme est peu marqué et se manifeste par la formation de nouveaux minéraux (essentiellement les zéolithes). Le métamorphisme d'enfouissement suit la diagenèse et précède le métamorphisme régional.

Tableau 4 : Comparaisons entre les différents types de métamorphisme

Type	Description	Effets	Exemples de roches ou minéraux	T	PO	PL	F
Contact	Forte augmentation de la température autour des intrusions magmatiques	Apparition de nouveaux minéraux sans orientation de la roche	Cornéennes	***			
Régional	Métamorphisme de fort degré caractéristique des chaînes de Montagnes.	Roches subissant une augmentation de la température et de la pression et sont toujours orientées	Ardoises Micaschistes Schistes Gneiss	***	***	***	*
Enfouissement	Métamorphisme se produisant à grandes profondeurs à la base d'épaisses couches sédimentaires	Transformations minéralogiques sans changement structurales	Zéolithes	*		***	*
Cataclastique	Intéresse de faibles volumes de roches le long des surfaces de failles	Minéraux orientés, bréchification	Mylonites Brèches tectoniques	*	**		
Hydrothermal	Dues à la circulation de fluides qui apportent des éléments chimiques	Métasomatisme (changement dans la composition, chimique des minéraux)	Skarns	*			***
Impact	Se produit dans les lieux de chutes de grosses météorites	Choc intense produisant des minéraux denses (de hautes pressions) à la surface de la Terre	Shatter cones Quartz choqués Stishovite Coésite Diamant	***	***		

T : température ; PO : pression orientée ; PL : pression lithostatique ; F : fluides.

2.3.5. Série des roches métamorphiques :

Le gros des roches métamorphiques (en volume) provient du métamorphisme régional. Il est rare que l'on puisse déterminer si une roche métamorphique vient de la transformation de telle ou telle roche (roche d'origine) à telle ou telle pression et température (trajet en P, T de la roche, c'est-à-dire son histoire métamorphique).

2.3.6. Classification des roches métamorphiques :

Les roches métamorphiques sont soumises à des températures et/ou pressions différentes de celles où elles se sont formées. Les roches se transforment à l'état solide. Ces transformations sont d'ordre :

- **Minéralogiques** avec apparition de nouveaux minéraux qui sont plus stable dans les nouvelles conditions de température et/ou pression.
- **Structurale** avec recristallisation de minéraux et/ou alignement des minéraux selon des plans bien définis due à l'application de contraintes orientées.

Une classification simplifiée des roches métamorphiques est basée sur la structure de la roche : roche **orientée (ou foliée) ou non orientée**.

- **Les roches orientées** sont classées selon le grade (degré) du métamorphisme (Tableau 5 et figure 25) : la granulométrie des grains minéraux augmente avec le degré du métamorphisme.

On distingue les structures orientées suivantes :

- **La schistosité** : feuilletage plus ou moins serré de certaines roches acquis sous l'influence de contraintes tectoniques orientées, en particulier celles qui prédominent au sein des chaînes de montagne en formation. La texture est alors caractérisée par une orientation préférentielle des minéraux, dont l'aplatissement ou l'allongement se développent dans une même direction.
- **La foliation** : structures de roches métamorphiques, où à la schistosité s'ajoute une différenciation pétrographiques entre les feuillets. On aura une alternance de bandes claires et sombres, chaque bandes étant caractérisée par des minéraux particuliers (exemple gneiss avec alternance de bandes quartzo-feldspathiques et bandes micacées).

Tableau 5 : Classification des roches foliées (orientées)

Conditions du Métamorphisme	200-300°C	300-450°C	> 450°C
Degré du métamorphisme	Faible	Moyen	Elevé
Nom de la roche	Ardoise	Schiste	Gneiss
Description de la roche	Les minéraux sont invisibles à l'œil nu. La couleur de la roche est foncée et montre un clivage caractéristique. Transformation des pélites et argiles.	Les minéraux sont de tailles moyennes. Les micas sont souvent visibles. Résultent de la transformation de roches argileuses, ardoises, granites et basaltes.	Roches à grains grossiers, foliées avec alternance de bandes claires et sombres. Les bandes peuvent être plissées. Résultent de la transformation de roches argileuses, schistes et granites.

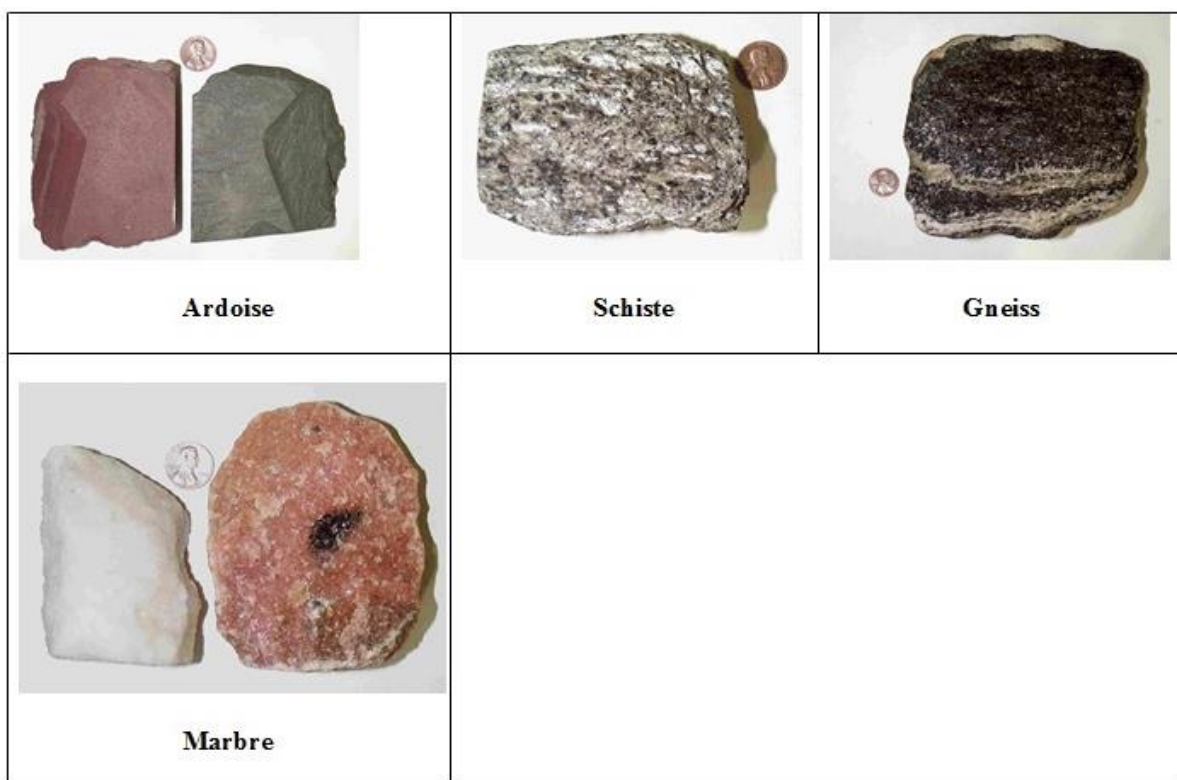


Figure 25 : Principales roches métamorphiques

Les roches non orientées sont classées selon leur composition chimique (Tableau 6).

Cette composition dépend de la nature de la roche mère ou originelle appelée : **protolithe**.

Tableau 6 : Classification des roches non orientées

Nom de la Roche	Marbre	Quartzite	Anthracite
Minéral	Calcite (CaCO_3)	Quartz	Carbone cristallin
Description de la roche	Roche dure à gros grains. Résulte de la transformation du calcaire et de la dolomie	Roche dure à gros grains. Résulte de la transformation du grès.	Roche dure, noire. Résulte de la transformation du charbon.

2.4.Conclusion :

La géologie cherche à comprendre les processus actuels, à reconstituer l'histoire passée de la Terre à partir de l'étude des roches et d'autres archives ou marqueurs géologiques. Un minéral est un matériau élémentaire de la roche. Toute roche possède une composition minéralogique bien définie exprimant la nature fondamentale du magma dont dérive la roche par cristallisation ou du matériau d'origine de la roche sédimentaire ou métamorphique. Dans une roche, les minéraux constituent l'essentiel des matériaux terrestres et extra-terrestres. Les roches sont constituées presque exclusivement de silice sous forme de quartz ou d'autres minéraux silicatés. Toutes les roches terrestres se retrouvent dans trois familles : les roches magmatiques, métamorphiques, et sédimentaires.

.

Chapitre III
Action des différents elements
sur les roches

1. Introduction :

L'aspect des paysages dépend des roches qui constituent le sous-sol. Ces roches sont soumises aux agents d'eau, le vent et les glaciers. Selon la nature des roches, ces agents modifient différemment les paysages. Dans ce chapitre, on verra comment agissent ces trois agents et quels en sont les résultats. Globalement, les continents tendent à s'éroder, ce qui entraîne une diminution de l'épaisseur de la croûte continentale qui, en vertu du principe de la compensation des masses, causera une remontée isostatique.

2. Action de l'air sur les roches : (action du vent) :

Le vent constitue un facteur important d'érosion et de transport des sédiments à la surface de la planète. Il est particulièrement actif dans les régions sèches où la végétation est quasi-absente, comme les déserts. Les régions désertiques, qu'on définit comme les régions qui reçoivent moins de 20 cm de précipitations/an, couvrent près du tiers de la surface terrestre. Les grands déserts du monde (Sahara, Kalahari, Gobi, les déserts d'Australie) se trouvent entre les latitudes 10° et 30° de part et d'autre de l'équateur (figure 26).

Dans les déserts, l'agent principal d'érosion et de transport des matériaux est le vent. Si le vent peut agir si efficacement pour éroder et transporter les particules, c'est qu'il n'y a ni humidité, ni végétation pour retenir celles-ci et les stabiliser. Le vent qui balaie la surface du sol entraîne donc facilement ces particules. Les particules sont transportées selon trois modes.

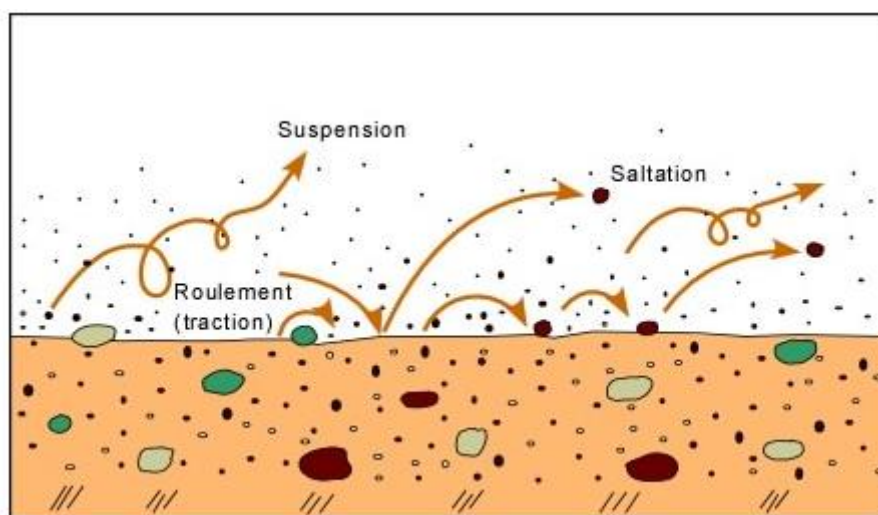


Figure 26 : Le mode de transport les particules par le vent

Les plus grosses se déplacent par roulement ou glissement (**traction**) à la surface du sol, sous l'effet de la poussée du vent ou des impacts des autres particules. Les particules de taille moyenne (sables)

se déplacent par bonds successifs (**saltation**). Les particules très fines (poussières) sont transportées en **suspension** dans l'air (loess), souvent sur de très grandes distances (figure 27).

Il en résulte deux structures importantes des déserts : les pavements de désert et les champs de dunes.



Figure 27 : Deux structures importantes des déserts

Le vent entraîne les particules de la taille des sables, mais n'a pas l'énergie nécessaire pour soulever ou rouler les plus grosses particules. Ainsi, ces plus grosses particules se concentrent progressivement à mesure de l'ablation des sables pour former finalement une sorte de pavement qui recouvre les sables et les stabilise, ce qui, par exemple, permet aux véhicules robustes de rouler aisément. Les sables transportés par le vent s'accumulent sous forme de dunes.



Figure 28 : Avancement de la dune

Ces dernières se déplacent, sous l'action du vent, par saltation des particules sur le dos de la dune; elles viennent de déposer sur le front de la dune, soit par avalanche, soit parce qu'elles sont piégées par le tourbillon que fait le vent à l'avant de la dune. C'est ce qui cause la structure interne en laminae parallèles inclinées qui indiquent le sens du déplacement de la dune.

3. Action de l'eau sur les roches:

L'eau est capable de **dissoudre** certaines roches: c'est le cas des roches **calcaires**. L'eau qui a traversé des strates calcaires contient du calcaire **dissout**: ce calcaire dissout réapparaît sous forme

de calcaire solide lorsque cette eau est chauffée (dépôt blanc visible dans nos casseroles dans la région parisienne).

3.1. L'eau participe à une désagrégation mécanique des roches :

Les variations de température entraînent la dilatation ou la contraction des roches soumises à des variations de volumes incessants, une roche fissure puis éclate. L'eau qui pénètre dans les fissures puis gèle avec augmentation de volume ajoute son effet : les cristaux de glace s'accroissent perpendiculairement à la surface de la fente et augmente son ouverture. L'eau qui gèle dans une fissure exerce une pression de 14 g/cm². La roche finit par éclater sous l'action du gel : c'est la **cryofracturation**. Ainsi, les grès et les marnes, roches gélives et utilisées comme amendement, étaient déposées en tas dans les champs en automne. On les retrouvait pulvérulentes à la fin de l'hiver ce qui facilitait leur épandage.

3.2. L'eau, un agent chimique d'altération :

De par ses propriétés et son abondance relative, l'eau se trouve à la base de toutes les altérations exogènes des roches. Les molécules d'eau sont chargées électriquement et se comportent comme des dipôles. Les propriétés de l'eau vis-à-vis des minéraux s'expliquent essentiellement par cette propriété. Pure, elle se comporte comme un acide faible par les ions H⁺ libres qu'elle renferme. Les réactions mettant en jeu la molécule d'eau sont de différents types et ont lieu essentiellement en climat humide. Les éléments solubles qui en résultent sont lessivés et les parties insolubles restent sur place, se recombinaient pour former de nouveaux minéraux, principalement des argiles. Ces réactions sont:

- **L'hydrolyse :**

Généralement, une fracture d'origine quelconque de la roche met l'eau contact d'un grand nombre de faces cristallines. Les molécules d'eau, dipolaires, s'orientent : leurs pôles négatifs sont dirigés vers la fracture. Des substitutions d'ions ont lieu entre le milieu cristallin et l'eau. Dans le cas de l'orthose (KAlSi₃O₈), par exemple, les ions H⁺ de l'eau prennent la place des ions K⁺ de l'orthose qui deviennent des ions libres dans l'eau. Ce phénomène d'hydrolyse entraîne donc un déchaussement des cations dans les édifices minéraux et la charpente silicatée n'est plus stable.

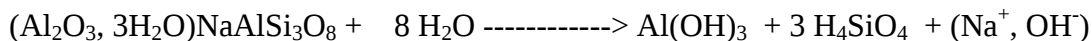
Une réaction générale d'hydrolyse peut donc s'écrire :

Minéral primaire + Eau -----> Minéral secondaire + Solution de lessivage.

Les hydrolyses peuvent être totales ou partielles.

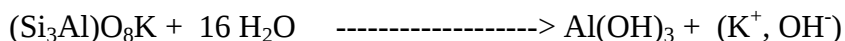
➤ **Les hydrolyses totales : le minéral est détruit en plus petits composés possibles (hydroxydes, ions)**

- Cas d'un feldspath sodique, l'albite :



Albite + eau gibbsite + [acide silicique + ions] précipité solution de lessivage

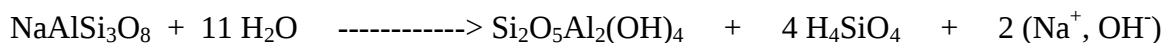
- Cas d'un feldspath potassique, l'orthose :



orthose + eau gibbsite solution de lessivage.

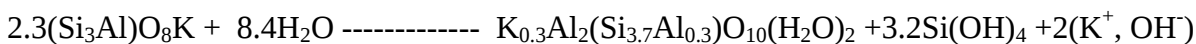
➤ **Les hydrolyses partielles : la dégradation est partielle et donne directement des composés silicatés (argiles). Ces composés diffèrent selon les conditions de milieu (abondance de l'eau).**

- Cas d'un feldspath sodique, l'albite :

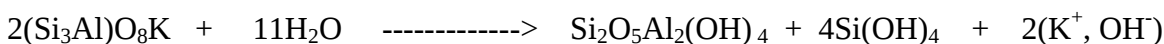


Albite + eau kaolinite + [acide silicique + ions] = solution de lessivage

- Cas d'un feldspath potassique, l'orthose



Orthose + eau smectite + solution de lessivage



Orthose + eau kaolinite + solution de lessivage

On constate facilement qu'en fonction de la quantité d'eau disponible, l'hydrolyse de l'orthose, par exemple, peut conduire à la formation d'argiles de nature différente. Notons que la kaolinite (ou kaolin) est une argile particulière utilisée dans la fabrication des porcelaines.

➤ **Facteurs externes contrôlant l'hydrolyse :**

Ce sont les facteurs physico-chimiques qui participent notamment à la définition du climat (figure 29)

- * la concentration en SiO_2 exprimée en concentration d'acide silicique H_4SiO_4 ,
- * la concentration en cations basiques (Na^+ , Ca^{++} , K^+),
- * le pH déterminé en particulier par les acides organiques,
- * la température dont l'augmentation régit la vitesse des réactions et la possibilité de dissolution des ions dans l'eau,
- * la vitesse de circulation de l'eau dans le milieu (drainage) exprimant les conditions de confinement ou de lessivage.

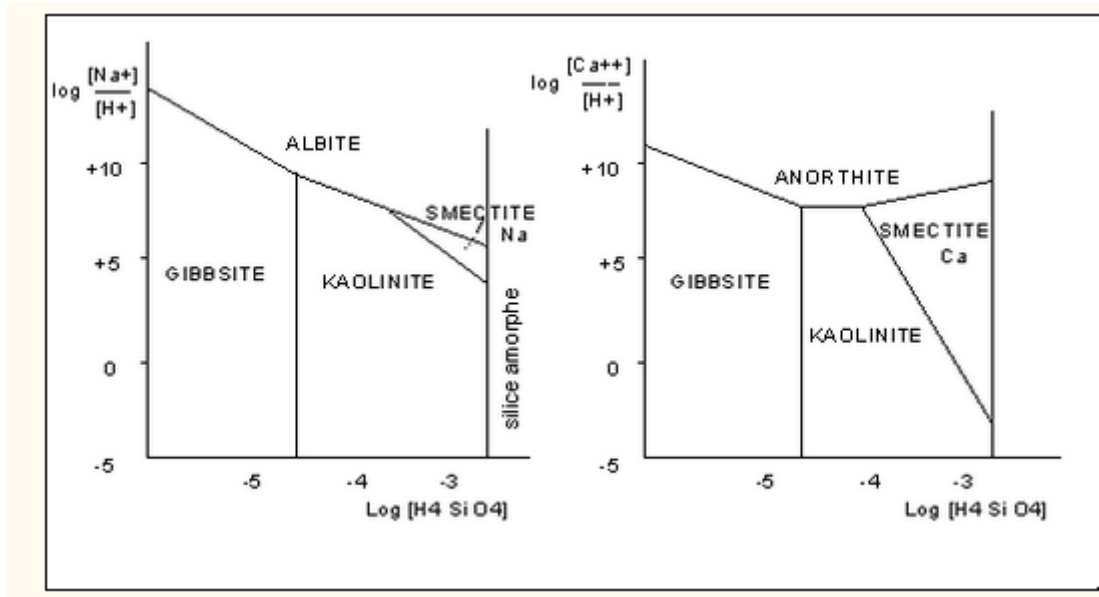


Figure 29: Champ de stabilité de deux minéraux en fonction de la concentration de la solution en ions et en acide silicique.

- **Action des acides organiques :**

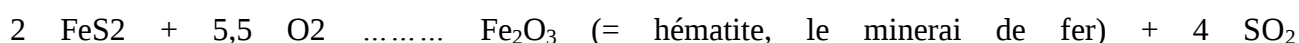
En climat humide et froid, la décomposition de la matière végétale donne naissance à des acides organiques (acides humiques) qui peuvent attaquer les silicates et former avec Al_2O_3 des complexes solubles qui sont éliminés. Les autres bases sont également éliminées et il ne subsiste à l'état solide que la silice (podzolisation). L'altération des roches dans ces conditions est donc maximale.

Par contre, en climat humide et chaud, la décomposition de la matière organique est quasi totale (ce qui explique l'absence d'une couche d'humus importante dans la forêt équatoriale) et donne naissance à H_2O et CO_2 [= H_2CO_3 (ou $\text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$)].

- **Oxydation et 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.

L'oxydation affecte tous les composés ferreux, et notamment la pyrite (FeS_2) suivant la réaction :



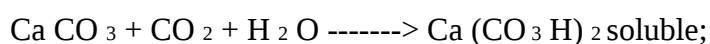
L'hydratation des oxydes est assez générale :

Hydratation et déshydratation, ou de manière plus concrète: minéral eau=nouveau minéral hydraté; la déshydratation étant le processus inverse. Les réactions les plus importantes sont:

- la déshydratation du gypse pour produire de l'anhydrite: $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}$;
- l'hydratation de l'hématite pour produire de la limonite: $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{Fe}(\text{OH})_3$;
- l'hydratation de la kaolinite pour produire de la gibbsite.

- **Décarbonatation :**

d) Elle produit la solubilisation des calcaires et des dolomies généralement sous l'action du CO_2 dissous dans l'eau:



Il en résulte des paysages particuliers, associés aux régions calcaires, c'est le cas, par exemple des reliefs karstiques. Les dolines sont des reliefs de surface du modelé karstique (figure. 30). Ce sont des dépressions circulaires dont le fond est occupé par de la *terra rossa*, résidu argileux rouge de la dissolution des calcaires.



Figure 30 : Surface du modelé karstique « Les dolines »

- **Dissolution:**

- ***Dissolution dans l'eau pure:***

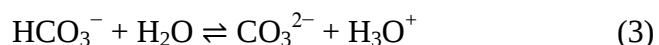
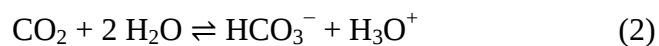
Une pincée de craie dans de l'eau pure ne semble pas se dissoudre. En effet, le carbonate de calcium est très peu soluble dans l'eau pure. Sa constante de solubilité (K_s) à 25 °C. On pourrait donc s'attendre à ce que le calcaire ne soit que peu altérable par l'eau.

- **Dissolution dans l'eau chargée en CO_2**

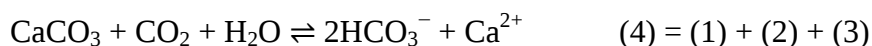
On constate toutefois que la même pincée de craie saupoudrée dans un récipient d'eau gazéifiée se dissout très rapidement. L'explication réside dans le fait que l'équilibre



est, en milieu aqueux, largement lié aux deux équilibres acido-basiques lié au CO_2 :



Selon la loi des équilibres chimiques, chacune de ces réactions est d'autant plus déplacée vers la gauche que l'eau est acide (riche en ions H_3O^+). Or la réaction (2) (dissolution du CO_2 dans l'eau) produit des ions H_3O^+ ; l'eau riche en CO_2 favorise donc la solubilisation du carbonate de calcium. Le bilan des deux réactions (dissolution du calcaire et dissolution du CO_2) peut donc s'écrire :



La constante d'équilibre de cette réaction, à 25 °C, est de $4,5 \times 10^{-5}$, soit beaucoup plus élevée que la constante de dissolution du calcaire dans l'eau pure. L'eau chargée en CO_2 a donc un pouvoir de dissolution du calcaire bien plus important que l'eau pure.

Le CO_2 étant, comme tous les gaz, d'autant plus soluble que la température de l'eau est faible (les réactions de dissolution des gaz sont exothermiques), les eaux les plus froides sont celles qui peuvent contenir le plus de CO_2 . L'altération des roches calcaires par le CO_2 dissout est donc maximale dans les régions humides et froides, soit les régions tempérées ou à latitude élevée.

4. Les glaciers :

Une formation glaciaire, issue du gel des eaux météoriques en altitude (névés), constitue un puissant agent d'érosion. Le front glaciaire, d'une part, fonctionne comme un bulldozer charriant devant lui des matériaux déjà frappés par des actions érosives (éboulis, roches désagrégées par des alternances gel-dégel). Ces formations s'appellent des moraines, dites « frontales » lorsqu'elles sont poussées par le glacier, « latérales » sur les côtés du glacier. À cette action s'ajoute une autre action érosive : celle de la glace elle-même, qui, sans être particulièrement abrasive, peut entraîner à sa base des particules qui feront office d'agent abrasif, un peu à la manière des substances qu'utilisaient les hommes du Néolithique pour polir la pierre. Il peut s'ensuivre un creusement important de la roche sur laquelle « coule » le glacier, avec un rabotage inégal de cette roche, qui laisse apparaître après fonte du glacier des « lacs » glaciaires fermés par un « verrou ». Lorsque ce lac vient à s'assécher, une végétation typique s'installe et peut conduire à la formation de tourbières, issues de la décomposition de la végétation de climat froid. De nombreux exemples de l'action des glaciers existent en nos régions, jusqu'à une latitude assez basse (au moins jusqu'à la vallée de l'Ouvèze).

4.1. Érosion glaciaire:



Figure 31 : Abrasion sur les flancs du glacier Perito Moreno en Argentine.

Les glaciers, de par leur poids, les roches qu'ils contiennent, les eaux de fonte qu'ils produisent, la nature et la dureté du substrat sur lequel ils évoluent ainsi que de leur grande capacité de transport érodent et modèlent le paysage en laissant des formes caractéristiques de leur passage (figure 31).

- Vallée glaciaire : une vallée glaciaire est une vallée jadis occupée par un glacier (de vallée en l'occurrence) et dont la coupe latitudinale révèle un profil en forme de « U » dit « en auge ».
- Cirque glaciaire : les zones d'ablation des glaciers peuvent créer des cirques si l'érosion est suffisante pour accentuer les pentes de la montagne.
- Pics et arêtes : les pics et les arêtes sont la résultante des sommets qui ne sont pas affectés par l'érosion glaciaire. L'exemple le plus célèbre est le Cervin. Dans les inlandsis et les calottes glaciaires, les équivalents des pics sont les nunatak.
- Roches moutonnées : les roches moutonnées sont un substrat rocheux qui a acquis une surface bosselée du même aspect qu'une toison de laine. Les roches moutonnées peuvent s'étendre sur des kilomètres.
- Abrupt d'arrachement : un abrupt d'arrachement est une partie en saillie du substrat rocheux dont la face aval présente une cassure quasiment perpendiculaire au passage du glacier, signe que la glace a débité des blocs dans la saillie rocheuse. Les abrupts d'arrachement peuvent atteindre des dimensions importantes et former des falaises.
- Poli glaciaire : un poli glaciaire est une surface rocheuse parfois de grande surface qui a été totalement aplanie et usée au point de devenir pratiquement lisse.

- Stries glaciaires : les stries glaciaires sont des entailles et des rainures dans la roche formées soit par le passage d'un rocher enchâssé dans la glace et qui a agi à la manière d'un burin, soit par le passage d'un cours d'eau sous-glaciaire qui a usé la roche.
- Lac d'origine glaciaire : les lacs formés par les glaciers se logent soit dans les parties surcreusées par le glacier (ombilic glaciaire), soit sont retenus par des moraines laissés par les glaciers lors de leur retrait.
- Seuil glaciaire : un seuil glaciaire est une partie rocheuse en saillie dans le fond d'une vallée qui a gêné le glacier dans son déplacement. Les seuils glaciaires comportent souvent à leur surface des roches moutonnées, des abrupts d'arrachement et une partie surcreusée de la vallée en amont.
- Épaulement glaciaire : un épaulement glaciaire est un replat perpendiculaire à une vallée glaciaire qui a été modelé par le passage d'un glacier. En général, deux épaulements se font face. On peut dire qu'ils constituent l'équivalent vertical de seuil glaciaire.

5. Conclusion :

Les continents, soumis aux contraintes physiques, biologiques, chimiques ou climatiques, s'altèrent, c'est-à-dire qu'ils se transforment et se dégradent. Il existe différents types d'altération. L'altération physique découle du ruissellement des eaux à la surface des continents. Elle constitue une désagrégation mécanique des roches. L'altération chimique est due à l'action de l'eau sur les particules constituant la roche, de l'oxygène qui oxyde les métaux contenus dans la roche et du gaz carbonique qui dissout les bases présentes dans la roche. On trouve aussi l'altération due au vent qui constitue aussi l'un des facteurs les plus importants pour la destruction des édifices du relief ainsi que pour la désagrégation des roches.

Chapitre IV
Notion de géodynamique

1. Introduction :

La géodynamique étudie, décrit et explique l'évolution du système terrestre ; à partir d'observations de terrain synthétisées par des modèles types de comportements, elle caractérise et étudie les phénomènes naturels qui ont affecté le géomatériau et qui l'affectent encore. Elle est interne pour ce qui se passe en profondeur et externe pour ce qui se passe en surface ; les phénomènes internes sont ceux qui produisent les reliefs ; les phénomènes externes sont ceux qui les détruisent.

En nombre limité, les phénomènes géodynamiques sont globaux et permanents ; leurs événements sont innombrables, mais les endroits où ils se produisent et les circonstances de leur production sont spécifiques : en profondeur comme en surface, il ne se passe pas n'importe quoi, n'importe où, n'importe comment, n'importe quand.

2. Géodynamique interne :

2.1. Séismes :

2.1.1. Introduction : La géodynamique interne s'intéresse aux processus internes de la planète ainsi qu'à leurs répercussions mécaniques en surface. Les grands phénomènes géologiques comme les tremblements de terre, les volcans, la formation des océans et des grandes chaînes de montagnes sont expliqués par le modèle de la tectonique des plaques. Le déplacement de ces plaques est la manifestation tangible de la dynamique qui affecte le centre de la Terre. Cette dynamique résulte du flux thermique provenant de la chaleur dégagée par la désintégration des éléments radioactifs contenus dans les roches. Cette énergie thermique est transformée en énergie mécanique par des courants de convection.

2.1.2. Cause du séisme :

Un tremblement de terre est une secousse plus ou moins violente du sol qui peut avoir trois origines : rupture d'une faille ou d'un segment de faille (séismes tectoniques) ; intrusion et dégazage d'un magma (séismes volcaniques) ; explosion, effondrement d'une cavité (séismes d'origine naturelle ou dus à l'activité humaine). En pratique on classe les séismes en trois catégories selon les phénomènes qui les ont engendrés :

- **Les séismes tectoniques :** sont de loin les plus fréquents et dévastateurs. Une grande partie des séismes tectoniques se produisent aux limites des plaques, où il existe un glissement entre deux milieux rocheux. Ce glissement, localisé sur une ou plusieurs failles, est bloqué durant les périodes inter-sismiques (entre les séismes), et l'énergie s'accumule par la déformation élastique des

roches. Cette énergie et le glissement sont brusquement relâchés lors des séismes. Le relâchement de l'énergie accumulée ne se fait généralement pas en une seule secousse, et il peut se produire plusieurs réajustements avant de retrouver une configuration stable. Ainsi, on constate des répliques suite à la secousse principale d'un séisme, d'amplitude décroissante, et sur une durée allant de quelques minutes à plus d'un an. Ces secousses secondaires sont parfois plus dévastatrices que la secousse principale, car elles peuvent faire s'écrouler des bâtiments qui n'avaient été qu'endommagés, alors que les secours sont à l'œuvre.

- **Les séismes d'origine volcanique** : résultent de l'accumulation de magma dans la chambre magmatique d'un volcan. Les sismographes enregistrent alors une multitude de microséismes (trémor) dus à des ruptures dans les roches comprimées ou au dégazage du magma. La remontée progressive des hypocentres (liée à la remontée du magma) est un indice prouvant que le volcan est en phase de réveil et qu'une éruption est imminente.
- Les séismes d'origine artificielle (ou « séismes induits »** : sont dus à certaines activités humaines telles que barrages, pompes profonds, extraction minière, explosions souterraines ou essais nucléaires peuvent entraîner des séismes de faible à moyenne magnitude.

2.1.3. Effets et intensité des séismes :

- Foyer et Epicentre :

Lorsqu'un séisme est déclenché, un front d'ondes sismiques se propage dans la croûte terrestre. On nomme foyer 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 (figure 32).

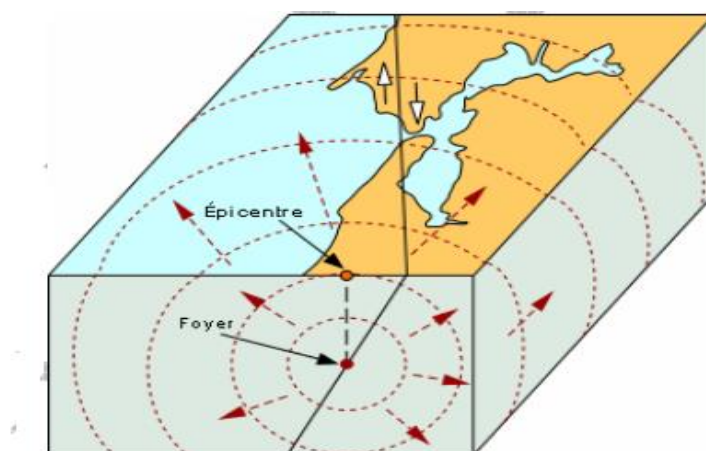


Figure 32 : Foyer et épicentre d'un séisme

2.1.4. Enregistrement des tremblements de terre :

- **Sismographe :**

Le déplacement lors d'un séisme peut être mesuré par un appareil simple : le sismographe qui enregistre dans les trois dimensions de l'espace (vertical et les deux directions du plan horizontal) le déplacement du sol par rapport à une masse très lourde qui reste presque immobile du fait de son inertie (il s'agit d'un appareil capable de "sentir" les vibrations du roc; ces vibrations sont transmises à une aiguille qui les inscrit sur un cylindre qui tourne à une vitesse constante). Les déplacements observés sont périodiques et sont qualifiés d'ondes sismiques. Sur les enregistrements on distingue plusieurs types d'ondes (figure 33).

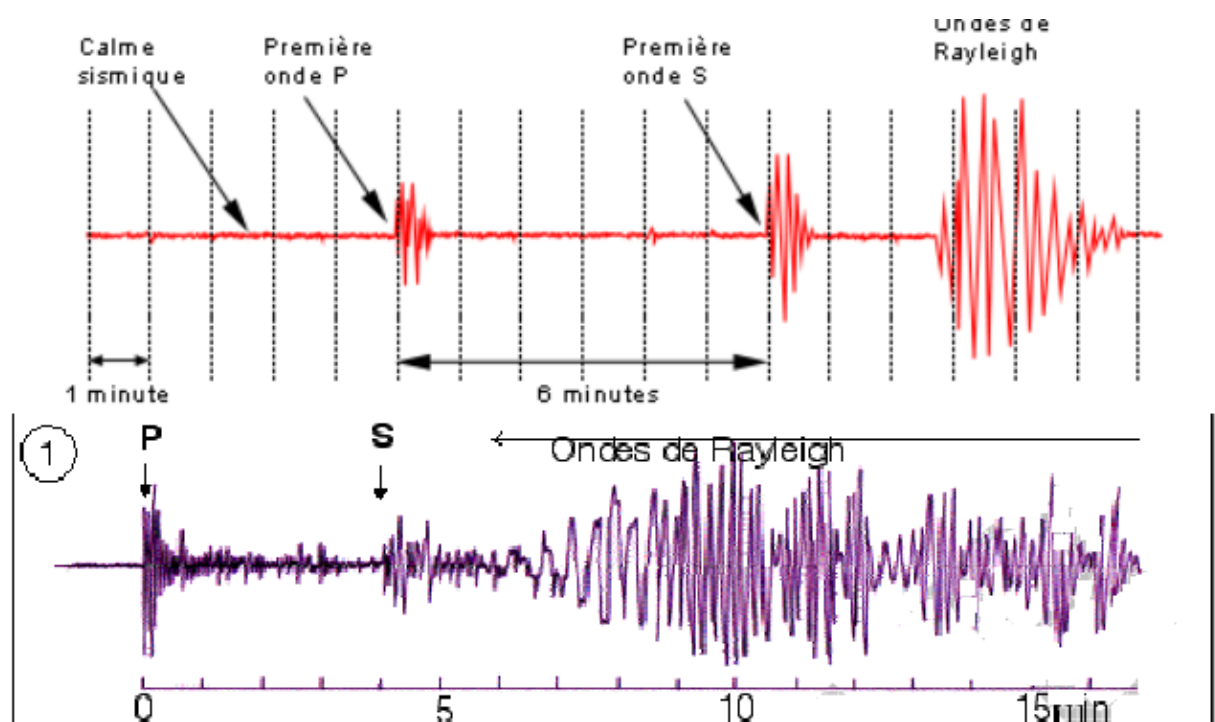


Figure 33 : Sismogramme d'un séisme

On distingue deux grands types d'ondes émises par un séisme: les ondes de fond, celles qui se propagent à l'intérieur de la terre et qui comprennent les ondes S et les ondes P, et les ondes de surface, celles qui ne se propagent qu'en surface et qui comprennent les ondes de Love et de Rayleigh (voir figure 33).

Les ondes **P** sont des ondes de compression assimilables aux ondes sonores et qui se propagent dans tous les états de la matière. Les particules se déplacent selon un mouvement avant arrière dans la direction de la propagation de l'onde.

Les ondes **S** sont des ondes de cisaillement qui ne se propagent que dans les solides. Les particules oscillent dans un plan vertical, à angle droit par rapport à la direction de propagation

de l'onde. Les ondes de **Love** ou ondes **L** sont des ondes de cisaillement, comme les ondes S, mais qui oscillent dans un plan horizontal. Elles impriment au sol un mouvement de vibration latéral. Les ondes de **Rayleigh** sont assimilables à une vague; les particules du sol se déplacent selon une ellipse, créant une véritable vague qui affecte le sol lors des grands tremblements de terre.

- **La profondeur du foyer** : On distingue trois classes de séismes, en fonction de la profondeur où ils se produisent :
 - **Les séismes superficiels** : Qui se produisent en faible profondeur, soit dans les premières dizaines de kilomètres, et qui se retrouvent autant aux frontières divergentes, c'est à dire le long des dorsales médio-océaniques qu'aux frontières convergentes au voisinage des fosses océaniques.
 - **Les séismes intermédiaires** : Qui se produisent entre quelques dizaines et quelques centaines de kilomètres de profondeur et se concentrent uniquement au voisinage des limites convergentes.
 - **Les séismes profonds** : Qui se produisent à des profondeurs pouvant atteindre les 700 km.

2.1.5. 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 épicentre. Comment arrive-t-on à localiser aussi rapidement et avec autant de précision un séisme? Les ondes sismiques sont enregistrées en plusieurs endroits du globe par des appareils qu'on nomme sismographes. Pour connaître ce point, il nous faut au moins trois enregistrements (figure 33).

2.1.6. Séisme en Algérie :

L'Algérie (Boumerdes) a connu, le 21 mai 2003 (voir figure 34), un terrible séisme qui a fait plus de 2000 morts et des milliers de blessés et de sans-abri.

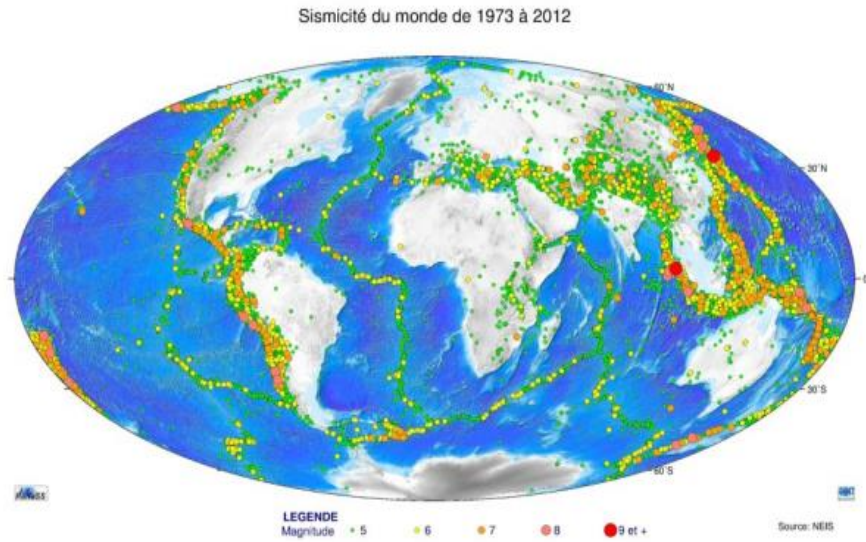


Figure 34. La sismicité du monde



Figure 35. Séisme de Boumerdes (Mai 2003)

Toute la côte nord de l'Algérie se situe dans une zone tectonique des plus propices aux tremblements de terre. On se souviendra du grand séisme dévastateur d'Al Asnam en 1980 qui a fait 3500 morts. La côte nord de l'Algérie est traversée par une limite de plaques lithosphériques continentales convergentes: la plaque eurasiennne, au nord, chevauche la plaque africaine au sud. C'est dans cette faille de chevauchement que se déclenchent les séismes de la région. La carte ci-dessous (voir figure 36) présente l'histoire sismique de la région depuis 1990. La plus part des séismes sont superficiels, dans la zone entre 0 et 33 km de profondeur.

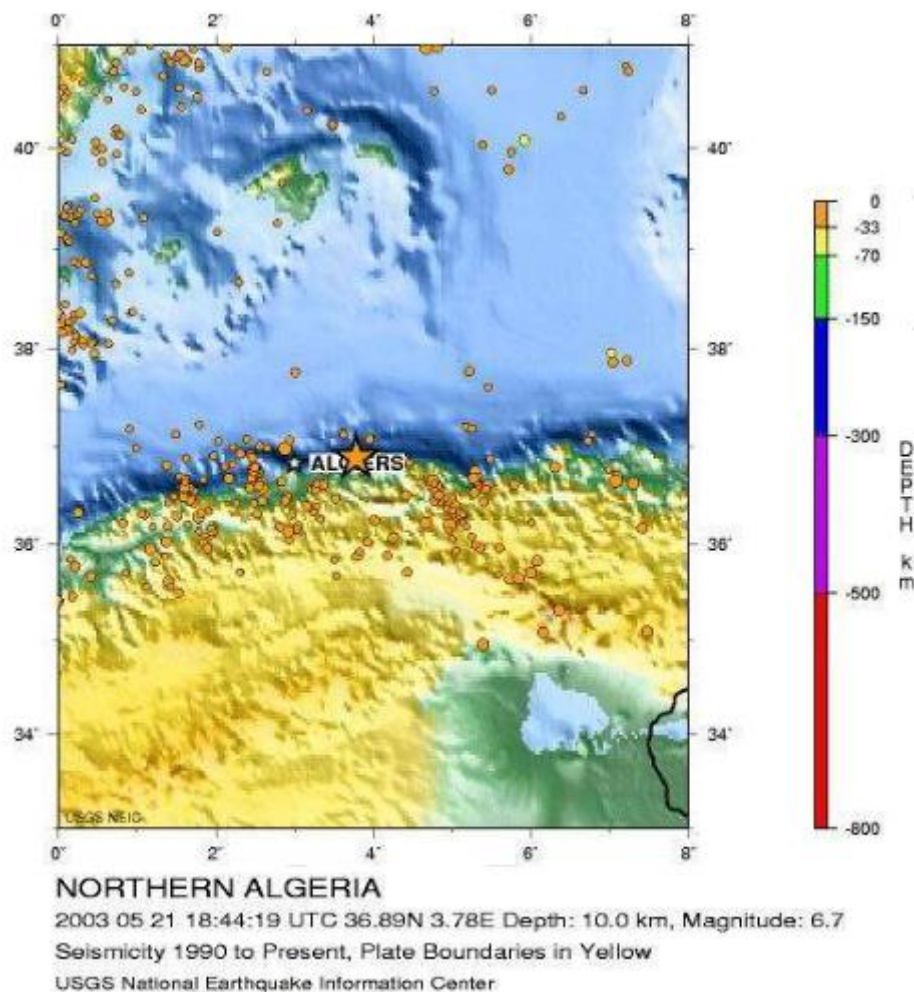


Figure 36 : Localisation des séismes en Algérie depuis 1990

2.1.7. La prévention contre les effets des séismes :

- Construire des maisons « antisismiques » (la solution japonaise consiste en des habitations basses et légères (bois, papiers) qui peuvent s'effondrer sans tuer les occupants).
- Des habitations moyennement hautes avec des fondations solides (voir figure 38) et avec la toiture légère.
- Eviter les terrains en pente (voir figure 37) et les terrains meubles (notamment les alluvions).

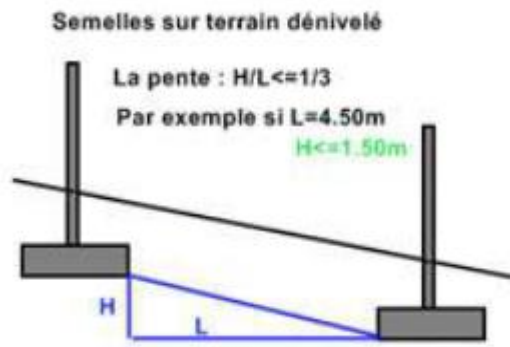


Figure 37 : Semelle sur terrain en pente

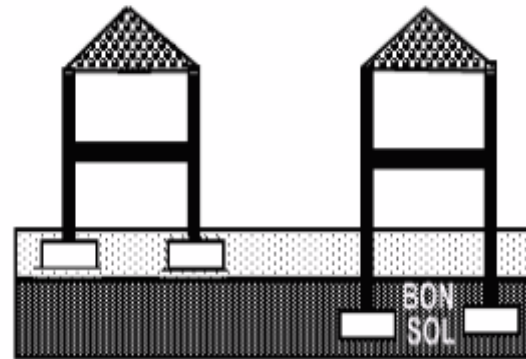


Figure 38 : Fondation sur le bon sol

2.1.8. Tsunami et raz marée : catastrophe consécutive a un séisme :

Le tsunami (nom tiré du japonais) engendre un phénomène particulièrement destructeur consécutif à un mouvement du fond sous-marin généré par un séisme, une éruption volcanique ou un glissement de terrain. Il est en quelque sorte surnoise parce qu'il peut survenir plusieurs heures après l'événement. Ce schéma illustre la nature d'un tsunami engendré par un soulèvement du fond marin causé par un séisme (voir figure 39).

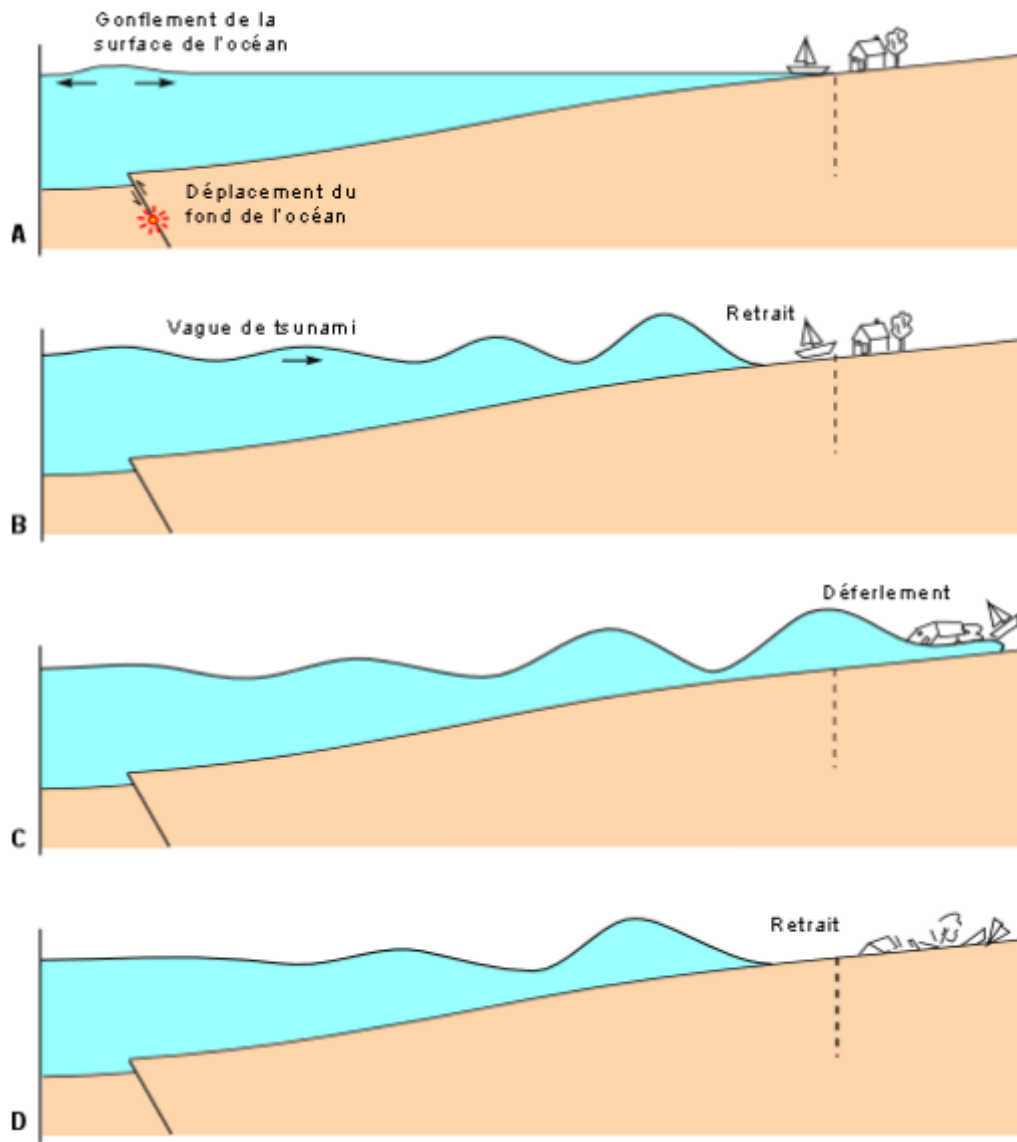


Figure 39 : Tsunami et raz de marée

(A) Le soulèvement du fond marin engendre un gonflement de la masse d'eau. Ce gonflement donne lieu à une vague qui en surface de l'océan est à peine perceptible (de quelques centimètres à moins d'un mètre d'amplitude en général), mais qui s'enfle en eau peu profonde pour atteindre des amplitudes pouvant aller jusqu'à 30 m. La vitesse de propagation de ces vagues est de 500 à 800 km/heure en eau profonde (milliers de mètres), diminuant à quelques dizaines de km/heure en eau peu profonde (moins de 100 m). La périodicité des vagues est de l'ordre de 15 à 60 minutes. Ainsi, un tsunami initié par un mouvement du fond marin à la suite d'un séisme qui se sera produit à 1000 km des côtes viendra frapper ces dernières environ 2 heures plus tard. On peut aisément imaginer l'effet destructeur de telles vagues déferlantes sur les côtes habitées et les populations.

Le phénomène de la vague déferlante qui balaie tout sur son passage est appelée raz de marée.

(B) À l'approche de la première vague de tsunami, il se produit d'abord un retrait de la mer.

(C) Vient ensuite la première vague.

(D) Celle-ci peut être suivie d'un second retrait, puis d'une autre vague, et ainsi de suite. On compte normalement quelques vagues seulement qui en général diminuent progressivement en amplitude.

2.2. Volcans :

Un volcan est un ensemble géologique terrestre, sous-marin ou extra-terrestre qui résulte de la montée d'un magma puis de l'éruption d'une partie de ce magma. Le magma provient de la fusion partielle du manteau et exceptionnellement de la croûte terrestre. L'activité volcanique est l'une des manifestations de l'activité interne de la Terre due à l'énergie emmagasinée en son sein.

2.2.1. Structure et reliefs :

Un volcan (figure 9) est formé de différentes structures que l'on retrouve en général chez chacun d'eux :

- Une chambre magmatique alimentée par du magma venant du manteau ;
- Une cheminée volcanique ;
- Un cratère sommital où débouche la cheminée volcanique ;
- Une ou plusieurs cheminées volcaniques secondaires partant de la chambre magmatique ; ou de la cheminée volcanique principale et débouchant en général sur les flancs du volcan ;
- 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 fissurée ;

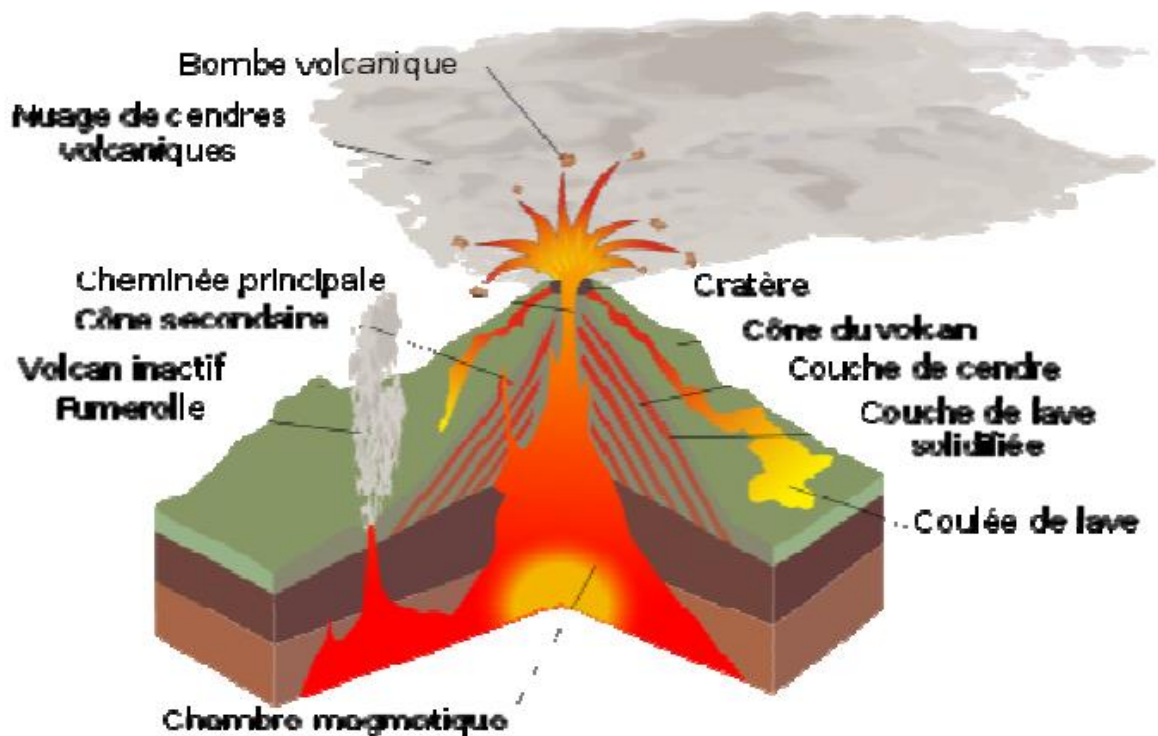


Figure 40. Structure et relief d'un volcan

2.2.2. Les formes des émissions volcaniques :

➤ Les laves :

Le matériau le plus connu émis par les volcans est la lave sous forme de coulées (plus longues que larges), elles sont formées de laves fluides qui s'écoulent le long des flancs du volcan.

La température de la lave est comprise entre 700 et 1200° C et les coulées peuvent atteindre des dizaines de kilomètres de long, une vitesse de cinquante kilomètres par heure. Elles peuvent avoir un aspect lisse et satiné ou un aspect rugueux et coupant (figure 41).



Figure 41: Exemple de lave

➤ **Les fumerolles (Gaz volcaniques) (figure 42) :**

Les appareils volcaniques émettent aussi des produits gazeux, les fumerolles, de température comprise entre 50° à 600°C. Le dégazage fait monter le magma, ce qui donne le caractère explosif et violent d'une éruption. Les gaz sont principalement la vapeur d'eau, H_2O (50 à 90 %) ; le CO_2 (5 à 25 %) ; le SO_2 (3 à 25 %). Puis viennent d'autres éléments volatils : CO , HCl , H_2 , H_2S . Le dégazage du magma en profondeur, peut se traduire à la surface par des fumerolles, autour desquelles des cristaux de soufre peuvent se former.



Figure 42 : Des fumerolles (présence de soufre dans les gaz)

➤ **Les projections :**

Le plus souvent, les matériaux volcaniques sont composés de tephres (ou ejectas) : cendres, bombes volcaniques, blocs rocheux ou basaltiques, etc. Il s'agit de magma et de morceaux de tout calibre arrachés du volcan qui sont pulvérisés et projetés parfois jusqu'à des dizaines de kilomètres de hauteur dans l'atmosphère. Les plus petits étant les cendres, il leur arrive de faire le tour de la Terre, portées par les vents dominants. Les bombes volcaniques, les plus gros, peuvent avoir la taille d'une maison et retombent en général à proximité du volcan.



Figure 43 : Bombe volcanique sur un lit de tephres

➤ **Les nuées ardentes :**

Appelées aussi coulées pyroclastiques, ce sont ces nuages gris qui dévalent les pentes des volcans à plusieurs centaines de kilomètres par heure, atteignent les 600 °C et parcourent des kilomètres avant de s'arrêter. Ces nuages composés de gaz et de tephres glissent sur le sol, franchissent des crêtes et consomment tout sur leur passage. Les empilements des matériaux transportés par les nuées ardentes peuvent s'accumuler sur des dizaines de mètres d'épaisseur.

Une de ces coulées pyroclastiques née de la Montagne Pelée de Martinique a rasé la ville de Saint-Pierre en 1902 et tué ses 28000 habitants à part 2 prisonniers protégés par les murs épais de leurs cachots.

2.2.3. Déroulement classique d'une éruption :

Une éruption volcanique survient lorsque la chambre magmatique sous le volcan est mise sous pression avec l'arrivée de magma venant du manteau. Elle peut alors éjecter plus ou moins de gaz qu'elle contenait selon son remplissage en magma. La mise sous pression est accompagnée d'un gonflement du volcan et de séismes très superficiels localisés sous le volcan, signe que la chambre magmatique se déforme.

Le magma remonte généralement par la cheminée principale, et subit en même temps un dégazage, ce qui provoque un trémor, c'est-à-dire une vibration constante et très légère du sol. L'éruption débute au moment où la lave atteint l'air libre. Selon le type de magma, elle s'écoule sur les flancs du volcan ou s'accumule au lieu d'émission, formant un bouchon de lave qui peut donner des nuées ardentes et/ou des panaches volcaniques lorsque celui-ci explose. Selon la puissance de l'éruption, la morphologie du terrain, la proximité de la mer, il peut survenir d'autres phénomènes accompagnant l'éruption : séismes importants, glissements de terrain, tsunamis, ... L'éruption se termine lorsque la lave n'est plus émise. Les coulées de lave, cessant d'être alimentées, s'immobilisent et commencent à se refroidir et les cendres, refroidies dans l'atmosphère, retombent à la surface du sol. Une éruption volcanique peut durer de quelques heures à plusieurs années et éjecter des volumes de magma de plusieurs centaines de kilomètres cubes. La durée moyenne d'une éruption est d'un mois et demi mais de nombreuses ne durent qu'une journée. Le record absolu est celui du Stromboli qui est quasiment en éruption depuis environ 2 400 ans.

➤ **Les divers types d'éruptions :**

Type Hawaïen

Type Vulcanien

Type Vésuvien

Type Péléen

Type Strombolien

Type Katmaïen (du Katmaï en Alaska)

Type explosif

2.2.4 La prévention contre le volcan :

La seule chose qui peut être envisagée et la plus part du temps d'organiser un système de prévention et d'avertissement qui permet d'évacuer en temps utile les populations menacées.

- Enregistrer les petites secousses de séismes locales, dont le nombre augmente énormément dans les jours qui précèdent une éruption.
- Eviter de construire dans les zones les plus menacées.
- Utiliser un barrage pour dévier la lave.

2.2.5. Conclusion :

La géodynamique interne, concerne les mouvements et les processus qui affectent l'intérieur de la Terre. Cette mécanique est décrite par la théorie de la tectonique des plaques, qui vient expliquer de grands phénomènes géologiques comme les tremblements de terre, les volcans, la déformation de la croûte terrestre et la formation des grandes chaînes de montagnes. Éruptions volcaniques et séismes ont des causes communes. Ils se produisent le plus souvent en des lieux particuliers, au contact des plaques rigides. Cependant les caractéristiques des éruptions varient d'un volcan à un autre, voire d'une éruption à une autre. Ses activités volcaniques et sismiques sont liées sur le pourtour de l'océan Pacifique tant dans les zones de rift que dans les secteurs de subduction.

3. Géodynamique externe :

3.1. L'altération superficielle :

3.1.1. Introduction :

Les processus physique (mécaniques) et chimique qui conduisent la roche saine à ses produit de décomposition sont appelés altération. En mobilisant sur place les éléments de la roche mère, l'altération est à l'origine des sols, en permettant leur redistribution par des agents dynamiques (gravité, vent, glace et surtout eaux courantes et océans).

3.1.2. Les processus de l'altération:

- **Désagrégation physique (mécanique) :**

Un massif rocheux n'est jamais absolument compact et homogène. Il présente des surfaces de discontinuité qui peuvent être dues à une modification des conditions de sédimentation (joints sédimentaires) ou à des contraintes qui tendent à déformer les roches. Ces contraintes se traduisent par des cassures (diaclasses) parfois accompagnées d'un déplacement (failles) ou même peuvent passer inaperçues bien qu'elles fragilisent la roche (figure 44).



Figure 44: Altération mécanique

- **L'origine des diaclasses :**

- Pendant la consolidation du sédiment.
- Pendant le refroidissement des roches volcaniques.
- Relâchement après l'effort tectonique.

Tout ceci contribue à l'agrandissement des diaclasses avec le gel et dégel et la présence de l'eau.

- **Variation de la température :** Le principal agent de désagrégation physique représenté par les variations de température dont l'amplitude journalière peut atteindre 50° C dans les régions désertiques.

Les variations de températures agissent indirectement en provoquant en région humide le gel de l'eau contenue dans les fissures. Il en résulte des ruptures de la désolidarisation des fragments lors du gel.

- **Existence des plantes :** Ont à la fois une action destructrice par leurs racines et leurs sécrétions, et protectrice de sols par le couvert végétal.

- **Résultat de la désagrégation des roches :**

Desquamation : Elle correspond à la transformation de la roche en petite particule et ceci surtout dans des roches homogènes et compactes.

L'émiettement : Transformation de la roche en miette, c'est le résultat de la désagrégation mécanique qui est favorisé par la transformation chimique.

2.1.3. Action de la pesanteur : Les processus physique (mécaniques) et chimique qui conduisent la roche saine à ses produit de décomposition sont appelés altération.

- **Versant rocheux :** Les particules qui résultent de la désagrégation des roches seront prise sur les pentes assez fortes par un transport sous l'effet de la pesanteur jusqu'au pied du versant (figure 45).

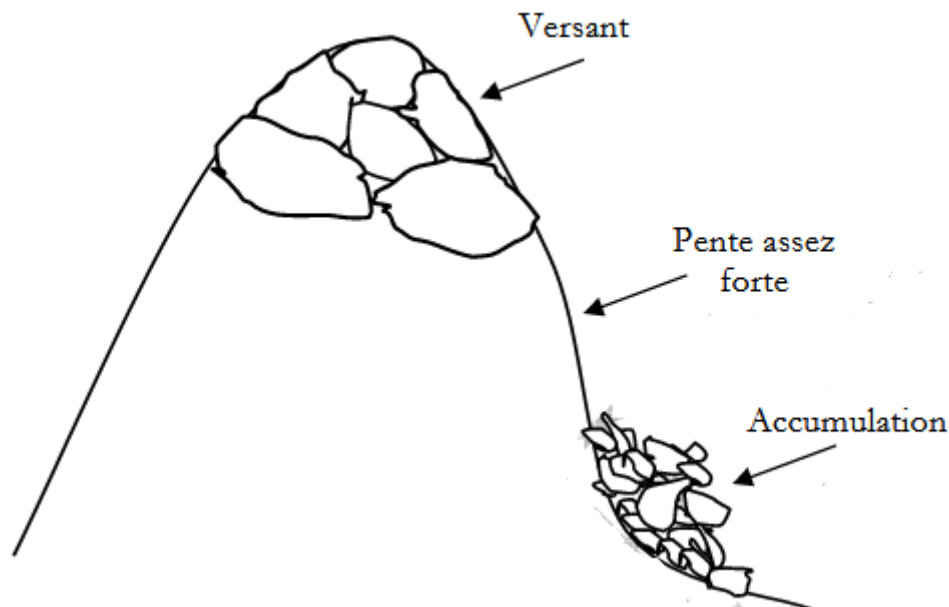


Figure 45: Altération des versants.

- **Eboulement :**

Il correspond à la chute brutale de toute une proportion d'un terrain de volume important. Les éboulements sont fréquents dans les régions où on trouve une falaise et ceci est très important lorsque les massifs rocheux sont fissurés. L'éboulement est brutal.

Il y'a 2 types d'éboulement (figure 46):

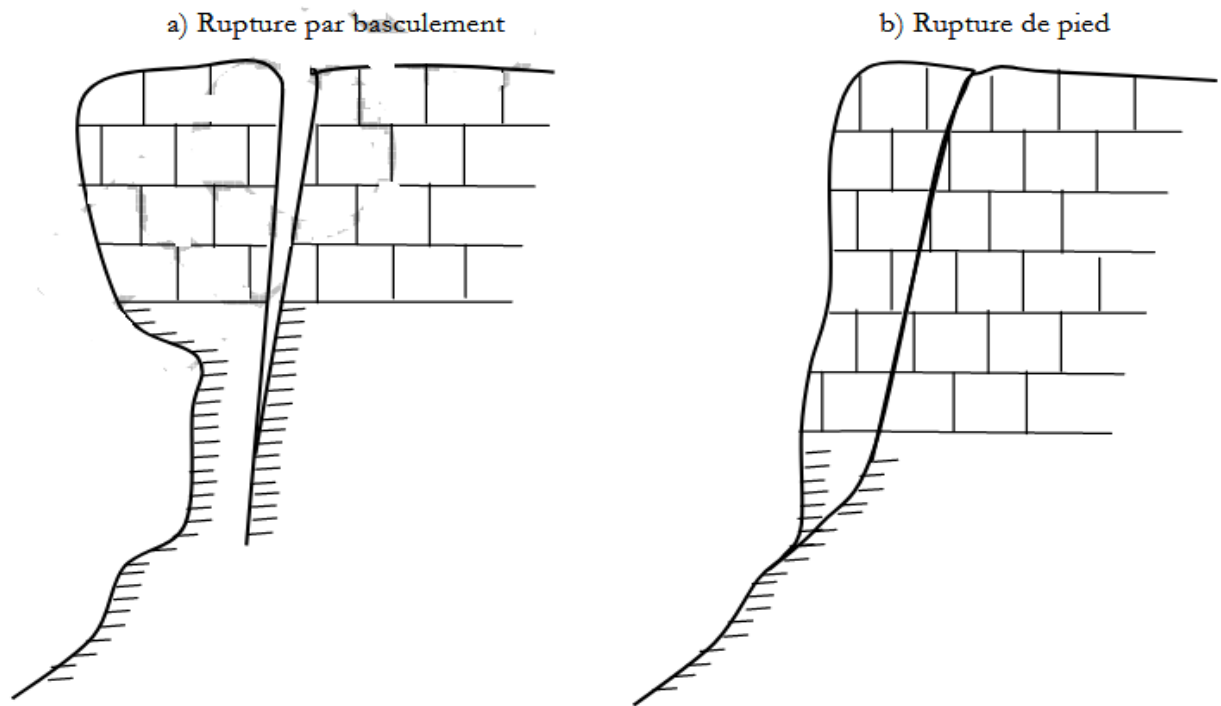


Figure 46: Eboulement

➤ **Eboulis :**

Ils sont les résultats d'un processus long du à un détachement successif de blocs rocheux un à un et ces blocs rocheux s'accumulent progressivement en bas de pente. L'éboulis est lent.

• **Méthodes de protection :**

- ✓ **Stabilité de la masse rocheuse :** Il existe toute une gamme de procédés, selon la taille du problème. Procédés légers pour des petits blocs : grillage, filets, béton projeté Soutènement et ancrage .Ces solutions sont souvent onéreuses ou même impraticables.
- ✓ **Dispositifs de protection passive :**
Leur but est de neutraliser l'effet du mouvement rocheux, sur les zones à protéger : Fosses de protection, barrages de protection.
- ✓ **Défense active :** Consiste à anticiper l'éboulement en le déclenchant par les explosifs. Ce procédé n'est pas toujours d'un succès à long terme mais, il serait bon de prévoir des protections passives, car ce procédé nécessite de gros travaux.

b) Versant meubles : On distingue 2 types de processus, Ruissellement et Solifluxion.

- **Ruissellement :** Son rôle sur les versants peut être très important lorsque les versants sont constitués d'une couche imperméable (tel que argile), le ruissellement sera fort et concentré et va donner naissance à des petits ravins (badlands).

Le ruissellement en présence du tapis végétal sera très faible voire nulle. Il sera conditionner par :

- Intensité de la pluie
 - Perméabilité du sol
 - Végétations
 - Pentes des versants
- **Solifluxion** : La solifluxion des versants meubles correspond à la descente sous forme boueuse sur une pente plus ou moins forte et d'une façon plus ou moins rapide. Définit sur le nom de glissement de terrain, ce processus fait appel à l'effet de la gravité et surtout à la présence d'eau.

- **Résultats de la solifluxion :**

Les loupes de glissement Les loupes de glissement correspondent à un détachement d'un versant assez grand et qui se déplace pour s'arrêter un peu plus loin (figure 47).

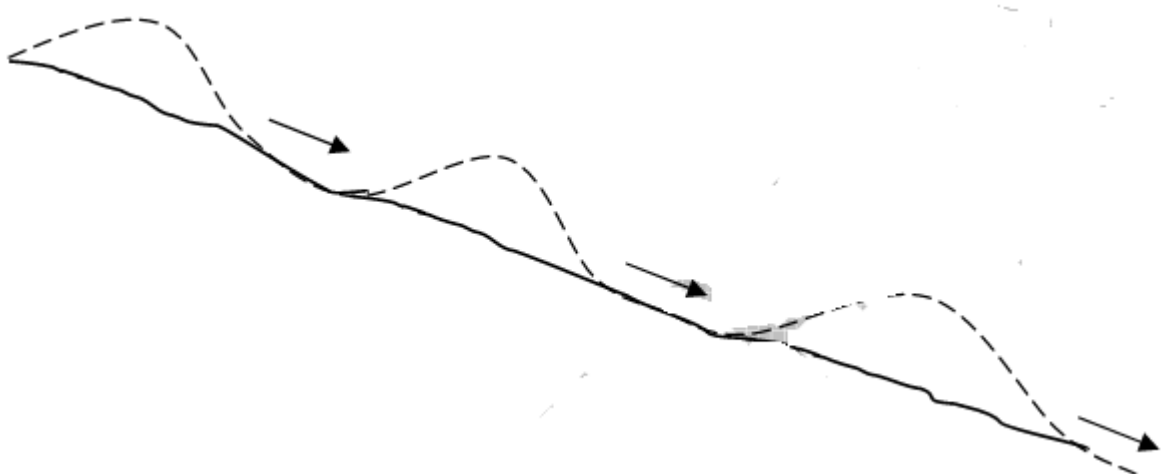


Figure 47. Loupes de glissement

Coulées boueuses : Déplacement des formations argileuse sur un versant et formation de bourrelets sans qu'il y ait arrachement.

Glissement à sec : C'est le déplacement par l'effet de la pesanteur d'une petite partie d'une formation meuble constituée de grains (sable).

3.2. Glissement de terrain:

Un glissement de terrain peut être défini comme le mouvement vers le bas d'une pente d'une masse de sols le long d'une surface de rupture, qui s'amorce dans un talus sous l'effet de la gravité (figure 48 et 49). La surface de rupture est celle le long de laquelle glisse la masse de sols.



Figure 48 : Glissement de talus - Saint-Pierre-de-Chartreuse (38) 12 août 2002.

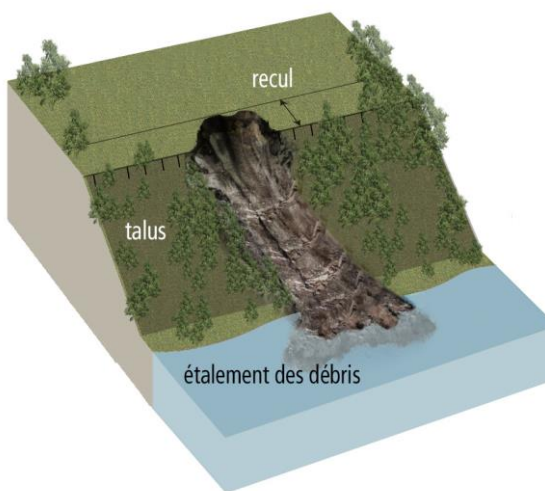


Figure 49 : Glissement de terrain

3.2.3. Caractéristiques et particularités des glissements :

Il s'agit de mouvements de masse qui mobilisent des volumes variables, pouvant aller de quelques m³ (glissements élémentaires) à plusieurs millions de m³ (glissements de versant). Ils affectent généralement des terrains plastiques et granulaires, mais les glissements de grande ampleur peuvent aussi concerner des versants rocheux déconsolidés ou broyés.

Il existe deux types principaux de glissement, caractérisés par la géométrie de leur surface de rupture (ou surface de cisaillement) :

- les glissements plans, dont la rupture s'effectue par simple translation le long d'une surface plane. Celle-ci correspond généralement à une discontinuité naturelle : joint de stratification, rupture tectonique (diacalse, faille) ou contact incliné entre deux formations distinctes (couverture superficielle sur substrat rocheux, par exemple) ;
- les glissements circulaires, qui se développent à la faveur d'une rotation sur une surface courbe et peuvent affecter des horizons relativement profonds.

Les vitesses d'évolution de ces processus sont généralement assez faibles, de quelques millimètres à quelques centimètres par jour, et dépassent rarement quelques mètres par jour, mais leur progression peut se poursuivre sur de longues périodes, marquées par des alternances de stabilisation relative et de reprise plus ou moins brutale, également par des régressions vers l'amont. Lorsque la phase liquide devient prépondérante, certains glissements peuvent alors évoluer en véritables coulées boueuses, caractérisées par une dynamique rapide et par une propagation importante.

3.2.4. Cause des glissements :

Les facteurs qui conditionnent la stabilité des pentes sont multiples (géologie, topographie, climatologie, hydrologie, état de désagrégation des roches) et il est souvent très difficile d'identifier avec rigueur les causes d'un glissement de terrain. C'est généralement la combinaison complexe d'un ensemble de facteurs qui conduit à la rupture, mais son déclenchement résulte, dans la majorité des cas, d'une action sur la géométrie des talus et du rôle de l'eau.

L'équilibre des pentes naturelles varie sensiblement en fonction des caractéristiques des roches constitutives et peut évoluer dans le temps sous l'effet de leur altération et de l'action de facteurs externes. Le déséquilibre peut à tout moment être atteint par la diminution des forces résistantes, suite à la suppression d'une butée de pied.

C'est le cas classique d'un déblai important qui génère une instabilité brutale du talus dominant, mais également des processus naturels de l'érosion qui déstabilisent lentement le pied d'un versant (sape basale par la mer ou par un cours d'eau, fonte d'un glacier). Le déséquilibre peut aussi résulter de la création d'une surcharge ponctuelle qui accroît les forces motrices (mise en place d'un remblai sur versant, par exemple).

Le rôle de l'eau est toujours très important, même s'il n'est pas unique, et il existe une très bonne corrélation entre le déclenchement des glissements et les intensités pluviométriques. L'accumulation d'eau dans un versant sensible, soit par infiltration directe ou rapprochée, soit par apports souterrains de provenance plus lointaine, influe directement sur les caractéristiques du matériau constitutif, en minorant sa résistance au cisaillement par augmentation de la pression interstitielle et diminution de sa cohésion. Ces effets peuvent se manifester sur l'ensemble d'un site menacé et s'y traduire par des amplitudes marquées du toit de la nappe souterraine, avec des crises d'instabilité souvent en phase avec les remontées piézométriques. Ils peuvent aussi ne concerner que certaines passées perméables au sein d'une formation imperméable ou un horizon aquifère profond susceptible de se mettre en charge sous des formations imperméables. De telles sous-pressions permanentes ou épisodiques facilitent le déclenchement des ruptures.

3.2.5. Traitement des glissements :

Les glissements de terrain étant essentiellement déclenchés par des facteurs d'ordre gravitaire et hydraulique, il est normal que les techniques de stabilisation agissent préférentiellement sur la géométrie et les masses ainsi que sur le drainage.

L'action sur la géométrie et les masses tend à restituer un profil d'équilibre aux zones instables, soit par terrassement (substitution des masses glissées par des matériaux frottant, butée de pied, déchargements de tête), soit par un soutènement de pied à l'aide d'ouvrages divers (murs poids, ouvrages ancrés, clouages).

L'eau joue un rôle primordial dans tous les phénomènes de glissement et son élimination doit rester un objectif absolu pour tendre vers la stabilisation. C'est pourquoi le drainage est utilisé presque systématiquement pour enrayer les glissements, soit comme méthode principale, soit en accompagnement d'une autre mesure stabilisatrice. Son but est de réduire les pressions d'eau interstitielle régnant dans le terrain, afin d'y augmenter la résistance au cisaillement et donc le coefficient de sécurité vis-à-vis de ruptures potentielles ou déclarées. Il est également nécessaire de maintenir ces pressions au-dessous d'un seuil jugé critique pour garantir la sécurité ultérieure du site. Une étude hydrogéologique très complète est alors indispensable pour concevoir un dispositif de drainage adapté. L'élaboration du projet nécessite, en particulier, une bonne connaissance de la nature des aquifères concernés, de leur extension et de leurs éventuels échanges, ainsi que de l'alimentation des apports d'eau qui entretiennent le mécanisme, afin d'être en mesure de maîtriser les facteurs hydrauliques défavorables par un type de drainage adapté (superficiel, amont, latéral, profond...). Des erreurs de conception ou de réalisation peuvent en effet conduire à une totale inefficacité du drainage, voire même à un effet néfaste sur la stabilité du site, à l'instar d'ailleurs d'un mauvais entretien ultérieur des dispositifs réalisés, même s'ils sont initialement très performants. Plusieurs modalités d'intervention peuvent être envisagées, en fonction de la profondeur des ruptures, de la géométrie globale du glissement, de la topographie des lieux et des conditions d'alimentation en eau : drainage de surface, tranchées drainantes, drains subhorizontaux, drainage vertical, drainage par galerie. Le drainage définitif d'un glissement ou d'un versant instable est généralement mis en œuvre de façon progressive, parallèlement à la création d'un réseau de piézomètres qui permet de contrôler son efficacité. Il est rarement figé et peut donner lieu, au cours du temps, à des travaux complémentaires ou de reprise, en particulier lorsque le contrôle met en évidence des inefficacités liées au manque d'entretien ou au colmatage de certains organes drainants.

- ***Le drainage superficiel***

La bonne gestion des eaux de surface joue un rôle important sur la stabilité des versants et il est indéniable que l'abandon progressif des anciens systèmes de drainage et d'irrigation entraîne aujourd'hui une dégradation rapide de nombreux versants, fragilisés par une divagation anarchique des écoulements d'eau.

Dès qu'un glissement s'est déclenché, l'intervention superficielle est toujours très utile pour tenter d'enrayer sa progression et peut donner lieu à des actions d'urgence lorsque la protection des fonds inférieurs les justifie et que la surface concernée le permet. Le but est alors de limiter les apports d'eau dans les fissures et dans les contre-pentes (colmatage des fissures, imperméabilisations locales par des feuilles de polyane, régilage de la surface déstructurée) et de favoriser l'exhaure des eaux accumulées sur le site (débridage de sources, création de fossés de drainage).

Le drainage superficiel peut contribuer à un retour à l'équilibre, lorsque les ruissellements ou les écoulements subsuperficiels issus de l'amont participent largement à l'alimentation en eau. C'est le cas, en particulier, lorsque les fonds dominants permettent un important ruissellement concentré vers la zone sensible, soit naturellement (large impluvium imperméable), soit sous l'effet des actions humaines (irrigation intensive, rejet volontaire de pluviales, ruptures et fuites de canaux d'irrigation et de réseaux enterrés).

Le drainage amont de ces apports d'eau et leur collecte latérale vers des exutoires stables permettent fréquemment une nette amélioration de la situation.

- ***Les tranchées drainantes***

Ce dispositif est fréquemment mis en œuvre lorsque l'horizon aquifère ne dépasse pas quelques mètres de profondeur. Il consiste à terrasser des tranchées, puis à les combler de matériau drainant propre, après mise en place d'une canalisation crépinée en partie inférieure et en prenant soin de limiter son colmatage ultérieur (choix d'une granulométrie respectant les règles de filtre ou interposition d'un géotextile anti contaminant). Ces tranchées doivent offrir une pente longitudinale élevée et être raccordées à un dispositif de collecte gravitaire.

De tels ouvrages sont parfois créés suivant les courbes de niveau pour intercepter les écoulements souterrains issus de l'amont et les collecter latéralement, hors de la zone sensible. Cette géométrie doit pourtant être déconseillée, en raison du risque réel de réinjection des débits collectés dans le corps du glissement, à la faveur de fuites résultant de reprises localisées ou d'un mauvais entretien.

Dans la majorité des cas, les tranchées drainantes sont ouvertes suivant la ligne de plus grande pente ou structurées en épis obliques raccordés à des tranchées collectrices implantées dans le sens de la pente. Leur objectif est de rabattre le niveau piézométrique en recoupant le maximum d'horizons ou de lentilles aquifères.

Les tranchées peuvent avoir de grandes dimensions lorsque les enjeux le justifient et que la profondeur du glissement le permet. Ainsi en est-il des fossés creusés au buteur jusqu'à la surface de cisaillement et remplis de matériau drainant. Leur profondeur peut atteindre la dizaine de mètres et il s'agit alors de véritables contreforts encastrés sur toute la hauteur du glissement et combinant un renforcement mécanique notable à l'effet du drainage). Dans le même ordre d'esprit, on a parfois recours à d'autres ouvrages mixtes établis au front du glissement pour rabattre la nappe et avoir une action mécanique favorable : les masques drainants, implantés suivant les courbes de niveau, ou les épis drainants, disposés suivant la ligne de plus grande pente.

- ***Les drains forés subhorizontaux***

Ils sont très largement utilisés, le plus souvent en association avec d'autres modes de confortement. Il s'agit de tubes crépinés de petit diamètre (généralement en métal ou en PVC), installés dans des sondages faiblement remontants, sur des longueurs pouvant atteindre ou dépasser la centaine de

mètres. Leurs principaux avantages tiennent à leur rapidité de mise en œuvre, à leur grande souplesse d'implantation et d'orientation et à l'écoulement gravitaire des débits recueillis.

- **Les galeries drainantes**

Lorsque la surface de glissement est très profonde ou que la topographie des lieux ne se prête pas à des opérations de drainage depuis la surface, celui-ci peut être réalisé à l'aide d'une galerie dont le principal inconvénient tient à son coût élevé.

La galerie peut permettre d'obtenir un rabattement significatif de la nappe qui imbibe ou qui menace la zone en mouvement. Son efficacité peut également être renforcée par la création de drains subhorizontaux périphériques forés depuis le souterrain.

3.2.6 Les type des mouvements :

3.2.6.1. Les glissements au sens strict : caractérisés par une surface de cisaillement, située à des profondeurs variant de quelques mètres à quelques centaines mètres. Ils concernent des matériaux meubles ou des roches très fracturées.

Les vitesses sont variables. Plus ces glissements sont superficiels, plus la fissuration du terrain est visible en surface.

3.2.6.2. Le fauchage : C'est un mouvement lent qui affecte des roches stratifiées redressées à la verticale, et entraîne un basculement vers l'aval des têtes de couches sur une épaisseur très variable (quelques mètres à quelques centaines de mètres). Les matériaux se désagrègent et passent à l'état de rocher disloqué puis d'éboulis. Des ruptures brutales peuvent se produire (figure 50).

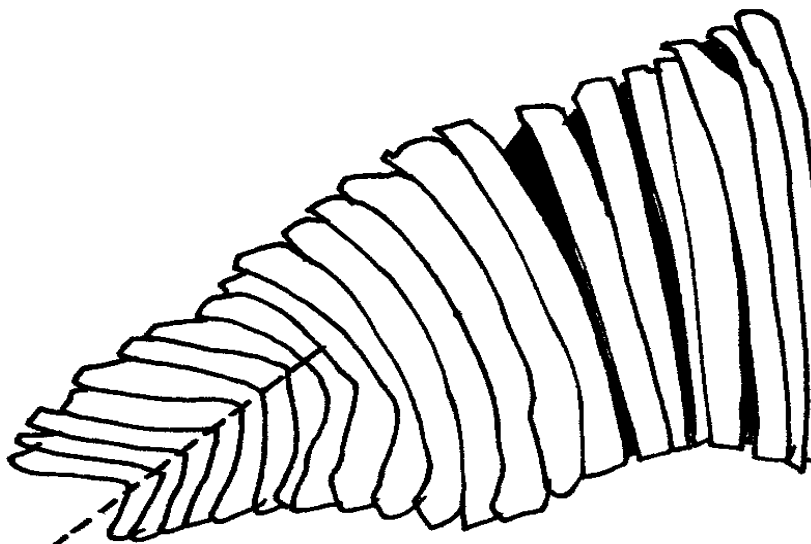


Figure 50 : C'est le cas du Bilan situé en rive droite de la retenue du barrage de Grand Maison dans l'Oisans, ou le grand glissement de la Clapière dans les Alpes maritimes

3.2.6.3. Les chutes de blocs et écroulements de masses rocheuses :

Les mouvements, à partir d'une falaise ou d'un escarpement rocheux, sont brutaux et rapides. Ils peuvent développer leurs effets sur de grandes distances.

On sait, aujourd'hui, modéliser par le calcul la trajectoire des chutes de blocs rocheux, en tenant compte de leur forme, de leurs rebonds, de leur nature et de celle du terrain de la zone supposée d'arrêt : ce qui permet de dimensionner les ouvrages de protection avec une bonne fiabilité. Dans le cas des éboulements en grande masse, l'interaction des blocs entre eux augmente la distance parcourue.

3.2.6. 4. Les coulées de boue : Lorsque les matériaux meubles d'un versant sont détrempés par des pluies abondantes ou la fonte des neiges, le matériau n'adhère plus à la pente et glisse en masse. L'eau peut aussi provenir du terrain (poches d'eau non drainées) ou être apportée par un ruisseau (figure51).

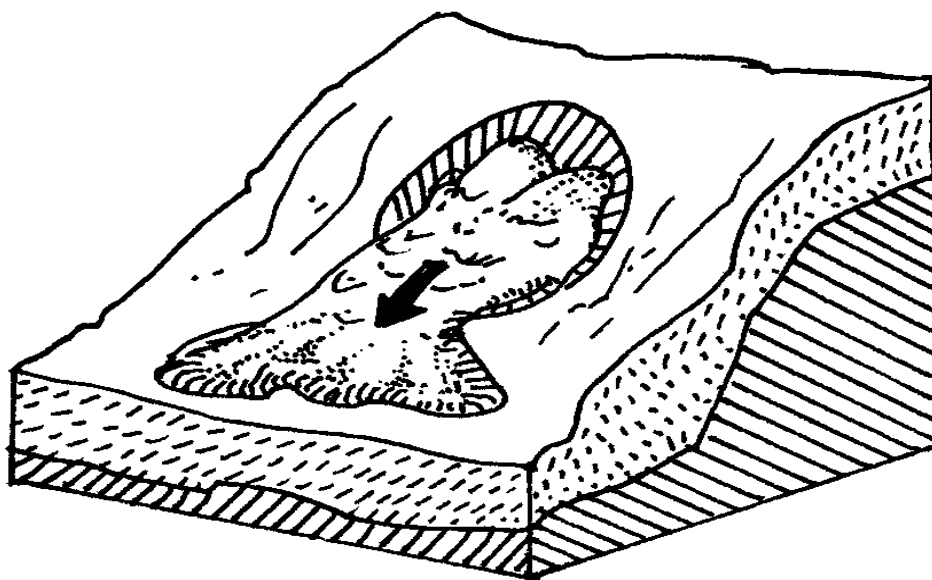


Figure 51. Coulée de boue du Plateau d'Assy (Haute-Savoie), 72 morts en 1970.

3.2.6.7. Les affaissements et effondrement :

Ces phénomènes naturels correspondent à des mouvements verticaux du sol, induits par l'existence de vides en profondeur. Ils résultent exclusivement de la circulation d'eau souterraine, évidant le sous-sol par dissolution de roches solubles ou par entraînement mécanique et hydraulique de matériaux fins. La genèse ou l'évolution de ces processus peut en outre être commandée ou aggravée par des actions humaines.

L'existence d'un vide en profondeur entraîne une redistribution des contraintes à sa périphérie et crée, en particulier, des efforts de traction et de cisaillement dans les terrains de couverture (phénomène de détente). L'accroissement des contraintes verticales et le lessivage des terres éboulées entretiennent le mécanisme qui évolue progressivement de manière ascendante. Dans

certain cas, sa progression est stoppée par un auto colmatage des vides (foisonnement des terrains foudroyés ou remblaiement hydraulique), mais il est fréquent qu'elle atteigne la surface du sol où elle provoque affaissement ou effondrement.

L'affaissement correspond à un phénomène progressif et lent qui matérialise en surface une dépression topographique de faible profondeur et à grand rayon de courbure.

Il marque l'aboutissement d'une déformation souple, correspondant au réarrangement continu des matériaux éboulés du sous-sol et à la résorption des vides.

L'effondrement se traduit par l'apparition brutale d'une ouverture ponctuelle, généralement cylindrique et de profondeur variable (de quelques mètres à quelques dizaines de mètres). Ces crevaisons du sol sont fréquemment qualifiées de fontis et résultent de la rupture brusque d'un horizon rigide qui, par sa résistance propre, a permis la constitution d'une voûte stable sous laquelle la cavité a pu se créer et s'étendre. Les désordres de surface résultant de tels phénomènes sont comparables à ceux qui peuvent se produire au toit d'anciens ouvrages souterrains créés par l'homme (carrières, mines, tunnels). Ils posent des problèmes importants pour la stabilité des aménagements constructifs établis dans leur aire d'influence et peuvent conduire à de véritables catastrophes.

a)Évolution naturelle :

Effets de la dissolution :

Les principales roches solubles sujettes à de tels mécanismes présentent des solubilités très variables. C'est essentiellement la vitesse d'évolution des phénomènes qui les distingue, car le processus général de création des réseaux souterrains reste comparable, avec une action initiale par dissolution le long des fissures permettant l'infiltration de l'eau, suivie d'une participation accrue de l'action mécanique des eaux au fur et à mesure de l'élargissement des conduits. L'organisation progressive des circulations souterraines permet l'établissement d'un réseau de drainage de type karstique et de son cortège de manifestations morphologiques : puits verticaux, galeries horizontales et salles au sein du massif ; vallées sèches, tables de lapiés et dolines sur les plateaux ; sources parfois étagées au bord des vallées.

Effets de la suffusion

La suffusion correspond aux processus d'érosion souterraine qui permettent un entraînement local de matière, dans des terrains meubles et non solubles. Ce sont les circulations d'eau qui enlèvent les particules les plus fines d'une formation hétérogène et favorisent des écoulements en chenaux suivant des axes préférentiels. Ce drainage peut se répercuter jusqu'en surface et permettre la formation d'affaissements ou d'effondrements, dont le tracé jalonne le cheminement des eaux souterraines.

b) Impact des actions humaines :

Les phénomènes d'affaissement et d'effondrement peuvent être générés ou aggravés par les interventions humaines, responsables de la dissolution provoquée d'horizons solubles, de la réactivation d'anciennes circulations karstiques ou du lessivage de remplissages meubles.

- **Les effets :**

Les effets sont variables selon le phénomène : barrage total ou partiel d'une vallée, obstruction de voies de communication, destruction totale ou partielle d'ouvrages, de constructions.

3.2.7. La prévision :

Il n'existe pas actuellement de système ou de moyens de prévisions fiables. Les réseaux de surveillance mis en place localement peuvent néanmoins permettre de détecter des indices annonciateurs de la rupture. Cependant il est difficile de déterminer le moment exact et l'endroit précis où celle-ci va se produire ainsi que le volume de matériaux concernés donc les dimensions du cône d'éboulis.

A défaut de pouvoir accéder à une évaluation quantitative du mouvement de terrain en termes de fréquence ou de période de retour pour une prévision, comme il est procédé pour les inondations, on a recours à la notion de prédisposition du site à produire un événement donné dans une fourchette de délais retenue. L'expert s'attache à reconnaître les antécédents, les indices précurseurs observables, les symptômes d'évolution, et à identifier et estimer les facteurs déclenchant de l'instabilité. Il s'agit essentiellement des paramètres du site tels que sa nature géologique, sa morphologie, sa topographie, les conditions hydrogéologiques et géotechniques du versant et tout facteur aggravant (pluie, séisme,...).

3.2.8. La prévention :

La prévention passe avant tout par la connaissance du phénomène créant le risque. La cartographie réglementaire par les Plans de Prévention des Risques naturels prévisibles (PPR) répond à cet objectif. Cette cartographie reste qualitative sauf dans les cas de risque potentiel et d'enjeux menacés importants.

Des études plus quantitatives sont menées pour déterminer les conditions géologiques, hydrogéologiques et géotechniques avec, si besoin, reconnaissances in situ (sondages géophysiques...). On s'efforce ensuite de faire un pronostic sur l'extension dans l'espace et en l'occurrence dans le temps, par une surveillance et une auscultation du mouvement : mesures de pression d'eau, mesure des déplacements en surface et en profondeur.

Chapitre V
Adaptation des techniques géologiques
aux besoins du génie civil

1. Généralité :

1.1. Rappels topographiques :

1.1.1. La carte topographique :

C'est la représentation plane, à une échelle déterminée, d'une partie de la surface terrestre. Le **relief** se représente par les **courbes de niveaux** (ou courbes hypsométriques), qu'on peut définir comme étant l'intersection de plans horizontaux équidistants avec la surface topographique. Le choix de **l'équidistance** (e) est dicté par le type de relief à représenter et par l'échelle de la carte. La **pente** d'un **versant** est perpendiculaire aux courbes de niveau et son sens est déterminé par la lecture de ces dernières.

L'**espacement** des courbes de niveau est inversement proportionnel à la valeur de la pente (Courbes espacées = pente faible; courbes serrées = pente forte). Sur une carte topographique, les **vallées** sont indiquées par une convexité des courbes de niveau dirigée vers l'amont en forme de « U » ou de « V » (en fonction de la morphologie de la vallée). Au fond de la vallée, le **talweg** est la ligne de drainage des eaux. Au niveau des **lignes de crête**, la convexité est dirigée vers l'aval. Les **collines** et **dépressions** fermées se marquent par des courbes de niveaux concentriques.

1.1.2. Notion d'échelle :

La projection planaire s'est faite sans réduction, ni agrandissement de la topographie initiale. Cependant, pour la réalisation d'une carte topographique (moins d'1 m²) d'une grande superficie de terrain (plusieurs dizaines de km²), il est évident qu'une forte réduction s'impose. C'est ce coefficient de réduction ainsi choisi, correspondant à un nombre fractionnaire, qu'on appelle **échelle**.

Autrement dit, l'échelle d'une carte (E) est le rapport de la longueur mesurée sur la carte (Lc), en une unité donnée, à la distance horizontale correspondante sur le terrain (Lt), à la même unité:

$$E = Lc/Lt$$

Exemples :

- l'échelle d'une carte dont deux points distants de 1 cm sur la carte et de 1 km sur le terrain est: $E = 1\text{cm}/100\,000\text{cm}$,

La carte sera dite à l'échelle 1/100 000 (représentation numérique).

- Deux points distants de 5 km, sont séparés de :

10 cm sur une carte au 1/50 000 (carte à petite échelle).

20 cm sur une carte au 1/25 000 (carte à grande échelle).

1.1.3. Le profil topographique :

L'établissement d'un profil topographique est particulièrement important car d'une part il permet de visualiser le relief et d'autre part, il est le support de la coupe géologique. Sa réalisation passe par les étapes suivantes (figure 52):

On choisit une ligne de coupe (A-B), matérialisée sur la carte par un trait au crayon.

- Le long de la coupe on applique le bord supérieur d'une feuille de papier millimétrée.
- Les intersections des courbes de niveau et de la ligne de coupe sont reportées sur la feuille et ensuite abaissées à leur altitude à l'échelle de la coupe.
- Ces différents points sont ensuite reliés entre eux par une courbe continue.

On obtient ainsi le profil topographique qui correspond à une courbe en coordonnées rectangulaires, avec les altitudes en ordonnée et les distances en abscisse.

Un profil correct doit avoir la même échelle que celle de la carte, mais aussi une échelle identique pour les hauteurs et les longueurs. Il doit aussi comporter un certain nombre d'indications : échelle, orientation de la ligne de coupe, localisation des points de repères fixes, nom des rivières et villages, etc.

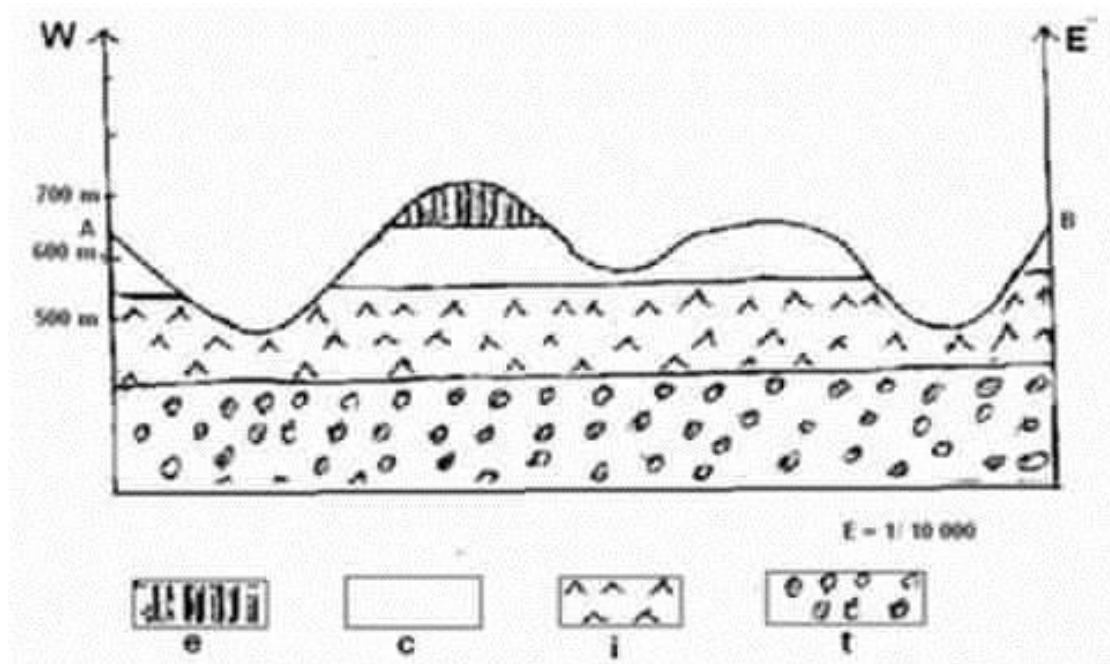


Figure 52 : Profile topographique d'une coupe géologique

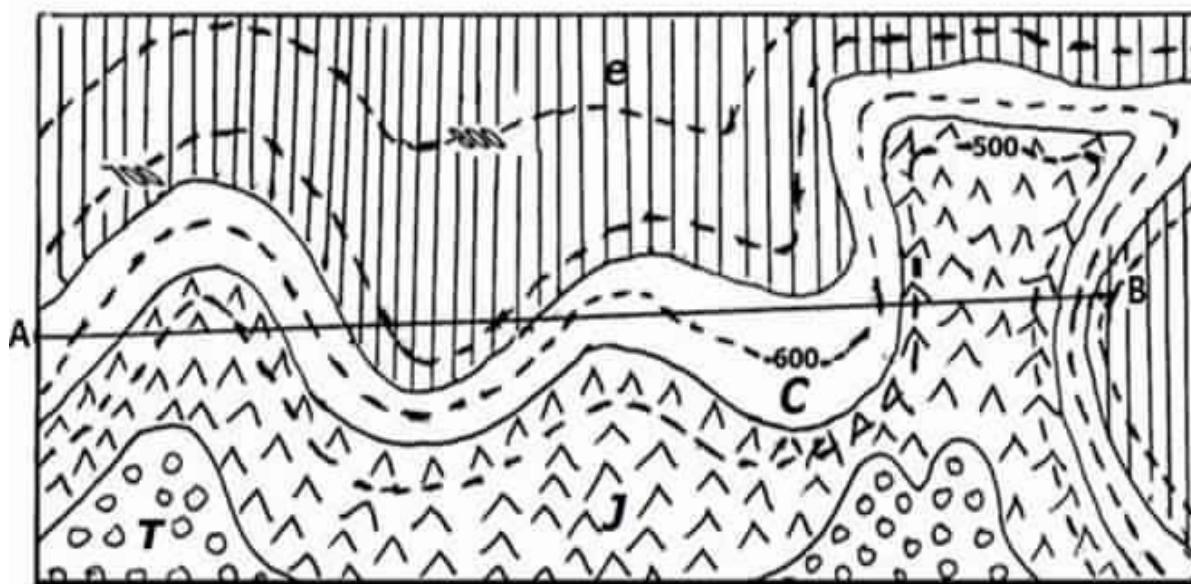
2. Présentation de la carte géologique :

2.1. Définition :

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.

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**.



Carte géologique

Echelle : 1/10000ème

Figure 53 : Carte géologique

Les différents terrains sont notés suivant leur âge pour les roches sédimentaires et leur nature pour les roches cristallines. Pour les roches sédimentaires, les roches sont représentées par des lettres rappelant les nomenclatures des différentes subdivisions de l'échelle stratigraphique.

Exemple pour l'ère secondaire :

Trias représenté par **T** ou **t** ;

Jurassique représenté par **J** ou **j** ;

Crétacé représenté par **C** ou **c** ;

2.2. Couche géologique :

Dans la plupart des cas, les roches sédimentaires sont naturellement subdivisées en **couches** ou **strates**, qu'on peut considérer comme un volume limité par deux plans de stratification : plans inférieur et plan supérieur.

2.3. Le plan de stratification : correspond à une surface assez régulière, séparant deux couches. Le plan qui sépare la couche de celle qui lui est sous-jacente (plus ancienne) détermine la limite inférieure de la couche, tandis que celui qui la sépare de la couche sus-jacente (plus jeune) en constitue la limite supérieure (figure 54).

Sur une carte géologique, chaque formation géologique est représentée par une **couleur** et affectée d'une **notation** (ou indice), qui indiquent leur âge géologique. Si on ignore celui-ci, on différencie

les formations à leurs caractères pétrographiques, comme c'est le cas habituel des terrains magmatiques et métamorphiques.

Sur toutes les cartes géologiques, la signification stratigraphique ou pétrographique de ces couleurs et notations est donnée dans la **légende** de la carte, qui figure généralement en bordure de celle-ci. La légende est toujours disposée de telle manière que les terrains se suivent dans l'ordre stratigraphique (du plus ancien à la base au plus récent en haut).

Les cartes géologiques fournissent aussi d'autres données relatives à la structure du sous-sol (pendage des couches, axes de plis, contacts anormaux,...), ainsi que des renseignements relatifs à la présence de substances minérales (minerais, pierres de taille, sables, sources, etc.).

La légende stratigraphique s'établit à droite et en bas de la carte selon le principe de la superposition :

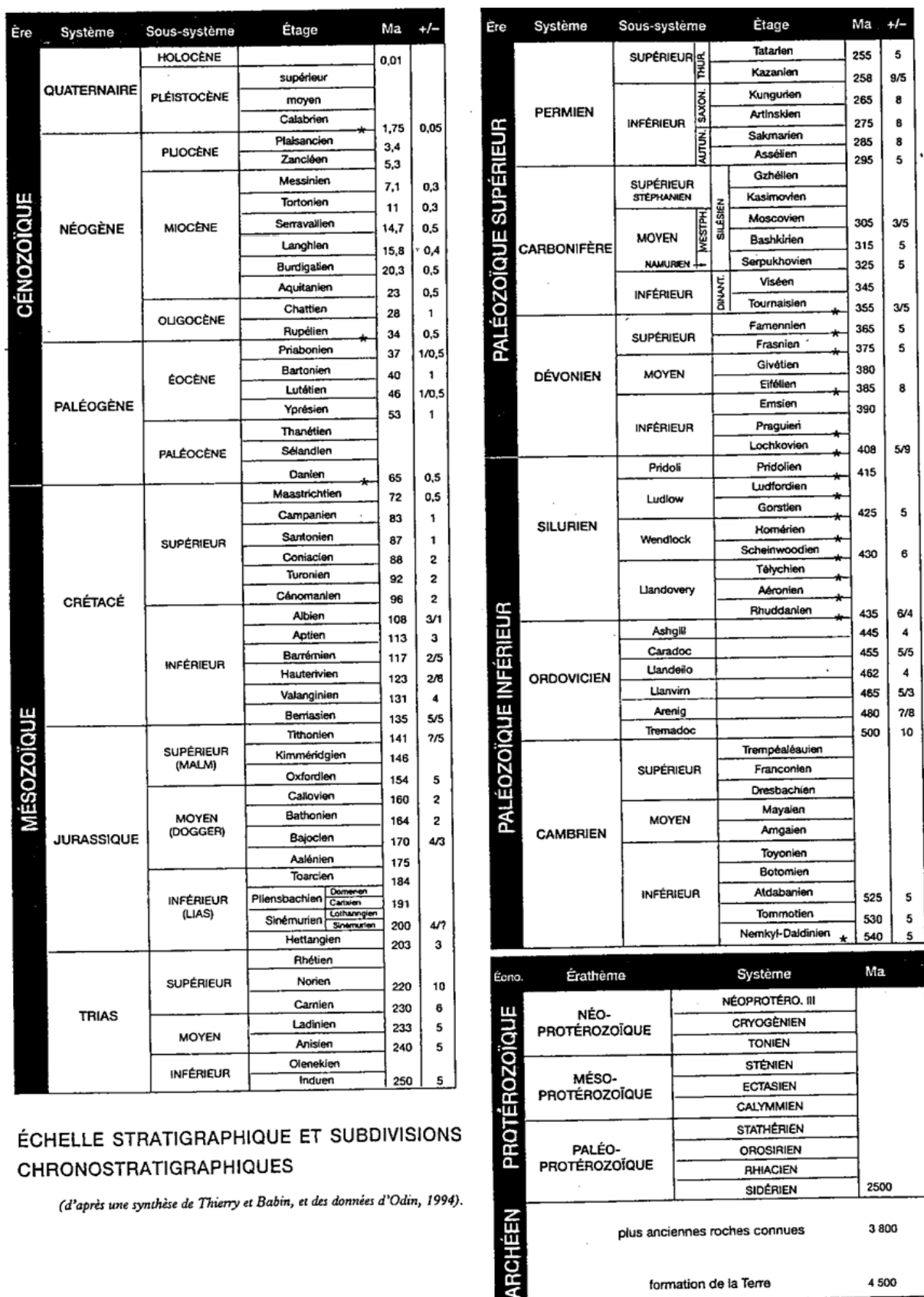
Méthode verticale : couche plus ancienne à la base et la plus récente au sommet ;

Méthode horizontale : couche la plus ancienne à droite et la plus récente à gauche ;

Note :

Une carte géologique est habituellement accompagnée d'une **notice** (livret) qui donne des précisions complémentaires et détaillées sur la région étudiée (situation géographique, description détaillée des terrains avec leur épaisseur, leur lithologie, les variations latérales, le contenu fossilifère, ainsi que l'évolution structurale de la région.).

- lors des levés de terrain, le **géologue cartographe** étudie les différents affleurements (formation géologique accessible à l'observation), selon différents aspects : tectonique, stratigraphique, pétrographique, paléontologique, etc... C'est à partir de ces observations, reportées sur la carte topographique (minute de terrain), que le géologue va tracer les contours géologiques. On conçoit dès lors que les cartes géologiques renferment une part, plus au moins importante, d'interprétations et d'hypothèses, en fonction de la densité des affleurements étudiés. Ce problème, bien réel dans les régions à fort couvert végétal (régions tempérées), ne se pose pas, ou peu, pour cartographier des zones arides ou semi-arides.



ÉCHELLE STRATIGRAPHIQUE ET SUBDIVISIONS CHRONOSTRATIGRAPHIQUES

(d'après une synthèse de Thierry et Babin, et des données d'Odin, 1994).

Figure 54 : Echelle stratigraphique international

3. Principe de la construction d'une coupe géologique :

3.1. Définitions :

Il existe trois principales méthodes d'étude d'une carte géologique :

- i) établir son **commentaire** géologique;
- ii) établir son **schéma structural** ;
- iii) réaliser des **coupes géologiques**.

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 déduite, 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 (figure 55).

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.

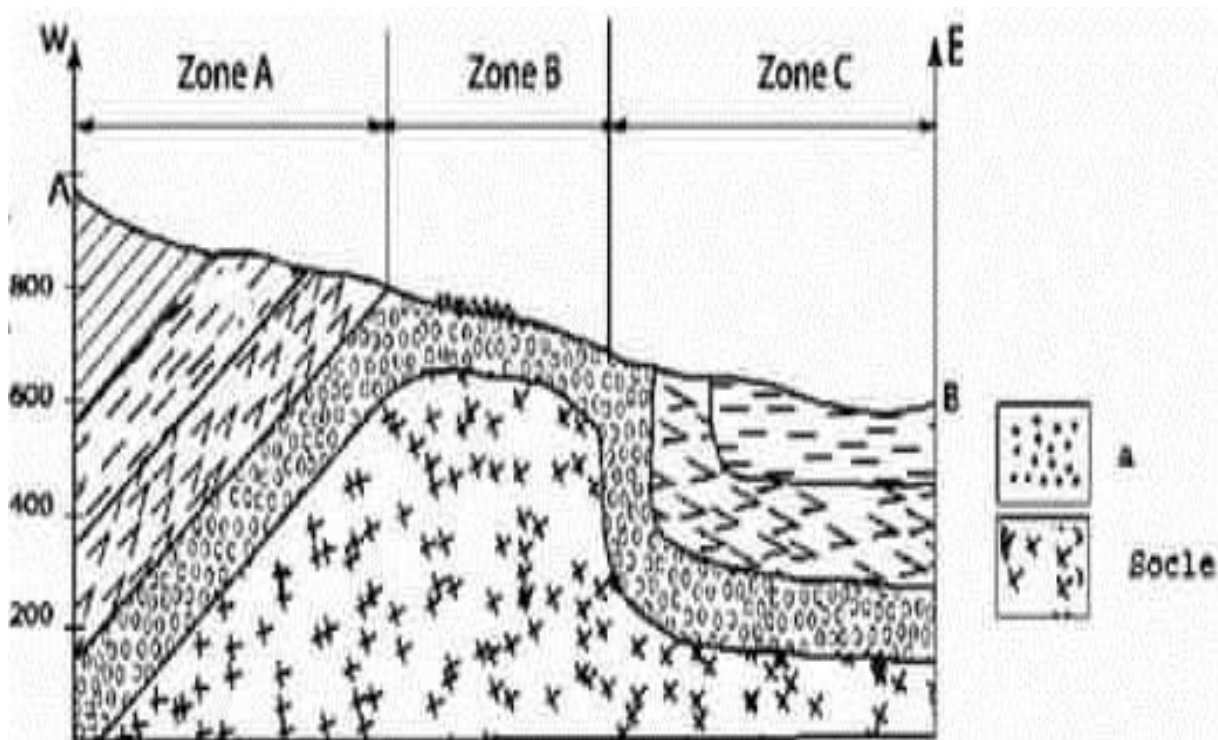


Figure 55 : Coupe géologique

3.2. Démarche à suivre :

- 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) A 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. Elle doit se faire en respectant des règles issues de la bonne lecture de la carte géologiques.

Deux règles fondamentales sont toutefois à respecter :

- Il faut commencer par dessiner la couche la plus récente, puisque les autres couches doivent se mouler sur elle.
- Appliquer les valeurs de pendages 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.

Remarque :

- La représentation d'une coupe géologique demande beaucoup de soin, d'application et de minutie, car il est bien évident qu'une erreur sur la projection des couches ou d'épaisseur entraîne des erreurs beaucoup plus graves sur la physionomie générale et l'exactitude de la coupe géologique (une erreur d'1mm sur une coupe réalisée à partir d'une carte au 100 000eme, représente une erreur réelle de 100 m).

3.3. 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.

3.4. Structures tabulaires :

Dans le cas d'une structure tabulaire, les couches sont horizontales ou subhorizontales, et n'ont, de ce fait, pas subi de mouvements tectoniques (ou peu), depuis leur dépôt.

Ce sont les structures les plus simples à reconnaître sur les cartes géologiques et les plus faciles à représenter dans les coupes géologiques.

3.4.1. Dans les régions à relief plat :

Cas d'un plateau par exemple, seule la couche la plus jeune affleure, et donc la seule représentée sur la carte géologique.

- Dans les régions marquées par une plus forte activité des agents d'érosion, les couches inférieures affleurent dans les versants des vallées, alors que les couches supérieures peuvent être isolées dans les crêtes.

La **largeur d'affleurement** (L) est directement proportionnelle à l'épaisseur (e) ($e_1 > e_2 \Rightarrow L_1 > L_2$) et inversement proportionnelle à la **pente** topographique (P) : ($P_1 < P_2 \Rightarrow L_2 < L_1$).

L'épaisseur des couches horizontales peut ainsi être facilement calculée, directement sur une carte géologique. Elle est en effet égale à la différence d'altitude entre sa limite (contour) inférieure et sa limite supérieure.

3.4.2. Coupe Géologique d'une structure tabulaire :

- Retrouver sur la carte géologique proposée les régions où les couches sont horizontales.
- Réaliser la coupe géologique demandée en adoptant la légende proposée.
- Déduire les épaisseurs des différentes couches.

3.5. Le pendage des couches : c'est l'inclinaison d'une strate par rapport à l'horizontale.

Il est symbolisé par différentes signes conventionnelles (figure 56).

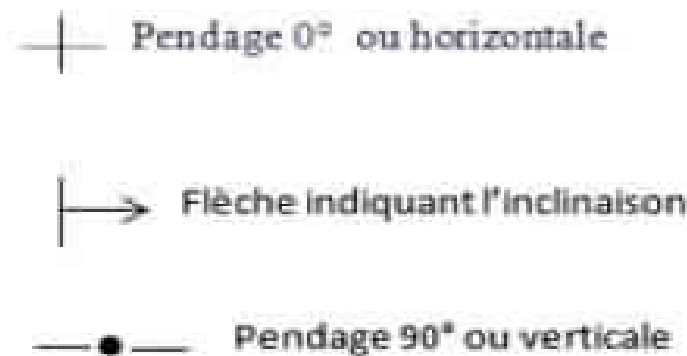


Figure 56 : Type de pendage des couches

Sa longueur indique l'angle d'inclinaison. La flèche précise la direction de l'inclinaison. On indique parfois, sur la flèche la valeur de l'angle de pendage.

Autres déterminations de sens de pendage s'il manque des signes de pendage

- Considération de l'ordre chronologique des couches dans la légende stratigraphique
- Considération de l'appartenance de couches dans une série plissée où existe un synclinal ou un anticlinal : pour le synclinal, la couche la plus récente affleure au centre des plus anciennes et pour un anticlinal c'est la couche la plus ancienne qui affleure au centre des plus récentes : on a une **structure plissée**.

- Considération des intersections de courbes de niveau et contours des couches :

Pendage nul si les limites des couches sont parallèles aux courbes de niveau : on a une **structure horizontale**.

Pendage 90° si les limites des couches traversent la vallée en ligne droite : on a une **structure verticale**.

Si les limites des couches présentent des formes V au niveau des vallées, les pointes de V des limites de couches indiquent le sens de pendage.

3.5.1. Détermination de valeur de pendage si l'épaisseur d'une couche est indiquée avec précision :

Soient A et B les limites de la couche dont l'épaisseur est donnée sur la surface topographique, le pendage est tourné de A vers B, alors A est la limite inférieure de la couche et B sa limite supérieure (figure 57).

De B, tracer un arc de cercle de rayon égal à l'épaisseur de la couche ; de A, tracer la tangente à ce même cercle : le segment AT (tangente à ce cercle) représente la limite inférieure de la couche et donne son angle de pendage exact avec le plan horizontal. On trace ensuite le parallèle à AT du point B pour la limite supérieure de la couche.

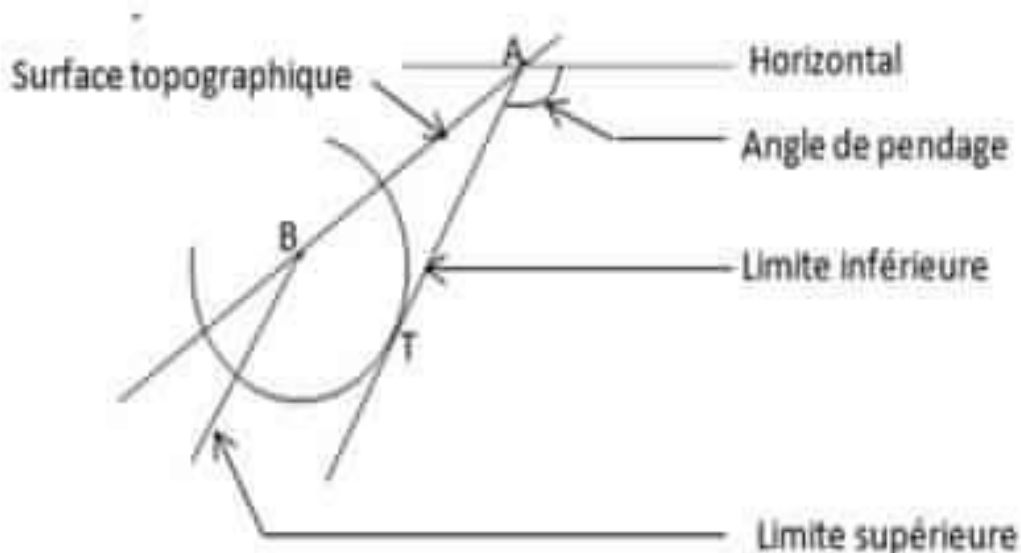


Figure 57 : Détermination la valeur du pendage d'après l'épaisseur d'une couche connu

3.6.1. Reconnaissance des failles sur les cartes géologiques :

Les failles étant assimilées à des plans, leur trace sur la carte répond aux mêmes règles que celles des plans de stratification pour la détermination de leur direction et pendage. Aussi bien sur les cartes que les coupes géologiques, les failles se dessinent avec un trait plus fort que celui des limites des couches.

3.6.2. Représentation des failles en coupe géologique :

Les failles étant forcément plus récentes que les terrains qu'elles découpent, leur dessin en coupe doit de ce fait se faire juste après la réalisation du profil topographique et avant la représentation des couches. On obtient ainsi plusieurs compartiments en fonction du nombre de failles. Le choix est libre de commencer par n'importe quel compartiment dans lequel on doit respecter l'ordre convenu de représentation des couches.

3.6.3. Reconnaissance des structures plissées sur une carte géologique :

Sur une carte géologique, les contours des couches plissées dépendent de la **topographie**, du **pendage des couches** mais aussi de la **géométrie de l'axe du pli**.

- **Structure plissée à axe incliné :**

Lorsque l'axe du pli est incliné, les contours des couches géologiques forment des « V » dont la pointe est dirigée vers le sens de l'inclinaison de l'axe, dans le cas d'un pli anticlinal et le sens contraire, dans le cas d'un pli synclinal.

- **Terminaison périclinale (périsynclinale ou périanticlinale) :**

On appelle terminaison périclinale l'intersection des charnières du pli avec la surface topographique.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] A. Foucault et J. -F. Raoult : Coupes et cartes géologiques, édition Doin 1975.
- [2] Alain Foucault & Jean-François Raoult. « Dictionnaire de Géologie » (4e édition) éd : Masson, 1995.
- [3] Bogomolov, G. «Hydrogéologie et notions de géologie d'ingénieur», Éditions du BRGM, 1984.
- [4] Calembert, L. & Pel J. « Introduction à la Géologie de l'Ingénieur » (2e édition), Cours de la Faculté des Sciences Appliquées de l'Université de Liège, 1972.
- [5] Charles, Pomerol & Maurice, Renard. «Eléments de géologie» (11e édition), Coll. Enseignement des Sciences de la Terre - éd : Masson, 1997.
- [6] Daniel, J.Y « Sciences de la Terre et de l'Univers», Vuibert, Paris. 2015
- [7] Debelmas, J. & Mascle, G « Les grandes structures géologiques» .5e édition. Editions Dunod, Paris,2008.
- [8] Dercourt, J. «Géologie : cours et exercices ». Ed. Dunod, Paris. 1999
- [9] François Michel « Cahier de géologie» la région Île-de-France et du Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie, 2015
- [10] G. Colas, G. Pilot, *Description et classification des glissements de terrain, Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées*, Numéro spécial, 2, 1976, p. 21-30 ;
- [11] Jean, Dercourt & Jacques Paquet. « Géologie : objets et méthodes » (9e édition), éd : Dunod, 1995.
- [12] Jean-Pierre, Michel. « Géologie Appliquée au Génie Civil » Notes du cours de prises par Olivier Germain au courant de l'année académique 1996-1997.
- [13] J. Aubouin, J. Dercourt et B. Labesse : Manuel de travaux pratiques de cartographie. Dunod, Paris, 1970.
- [14] J. Palmer, Creeping earth could hold secret to deadly landslides ; Scientists investigate why mountain slopes can slip slowly for years and then suddenly speed up, with potentially fatal effects [archive], Nature News, 2017
- [15] M. Archambault, R. Lhénaff et J. R. Vanney : Documents et méthode pour le commentaire de cartes (géographie et géologie), Masson, Paris, 1974.
- [16] M. Frayssines, *Contribution à l'évaluation de l'aléa éboulement rocheux (rupture)*, Thèse de l'université Joseph Fourier (Grenoble 1), 2005, 218 p.

Références bibliographiques

- [17] Pascal Bernard, *Qu'est-ce qui fait trembler la Terre ? À l'origine des catastrophes sismiques*, EDP Science, 2012, p. 74-80.
- [18] Pierre-André Bourque. « Planète Terre » cours de géologie générale Université Laval (Québec) disponible sur la toile, 2000
- [19] Raoul Madariaga, Guy Perrier, *Les tremblements de terre*, Presses du CNRS, 1991, p. 37.
- [20] Scholtz, C.H., 1988, The brittle-plastic transition and the depth of seismic faulting: *Geologische Rundschau*, v. 77, p. 319-328.
- [21] Walter Schumann « Guide des Pierres et Minéraux » (1e édition), éd:Delachaux & Niestlé. , 2000.
- [22] <https://cursus.edu/fr/19363/planete-terre-ou-comprendre-lorigine-de-la-planete>
- [23] <http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s1/tectonique.pl.html>
- [24] <http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/img.communes.pt/str.interne.terre.html>
- [25] <http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s2/mineral.roche.html>
- [26] <http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s2/esp.minerale.html>
- [27] <https://www.le-comptoir-geologique.com/identifier-mineraux.html>
- [28] <http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s3/vent.html>
- [29] <http://acces.ens-lyon.fr/acces/thematiques/limites/Temps/allee/comprendre/les-etapes-de-laformation->

Résumé :

La Géologie est la science de la Terre. Elle s'intéresse particulièrement à l'écorce terrestre au travers de ses constituants, de son histoire et de son évolution.

L'objectif premier de l'ouvrage est d'offrir une synthèse scientifique et méthodologique de la géologie, en se basant sur les connaissances et les compétences acquises. Il présente, des définitions et des rappels sur la Géologie. À l'issue du module, les étudiants auront acquis une bonne connaissance sur la formation de la terre et sa structure interne, l'ensemble des processus qui affectent la surface de la Terre.

Le présent cours est destiné aux étudiants de deuxième année tronc commun Science et technologies filières : «Génie Civil, Travaux Public et Hydraulique» est structuré en cinq chapitres précédés par une introduction qui étalera les objectifs de la géologie, les constituants du monde ordonné « l'Univers », et la position de notre planète dans le système solaire. Le document est organisé en cinq chapitres :

Dans le premier chapitre, on présente, des notions d'ordre général, tels que de la définition de géologie, Division de la géologie, ainsi que la structure interne de la terre. Le deuxième chapitre, définit les notions de base de la minéralogie, la présentation des différents types de roches (les roches ignées, les roches sédimentaires, les roches métamorphiques et les roches meubles), ainsi que leurs cycles de formation. Le troisième chapitre est consacré à la présentation de l'action des différents éléments sur les roches, à savoir : le vent, l'eau, et les glaciers. Le quatrième chapitre décrit en brefs, ainsi que les notions de la Géodynamique interne (Séismes, volcans). Enfin, dans le cinquième chapitre nous traitons l'adaptation des techniques géologiques aux besoins du génie civil telles que la cartographiques géologiques, l'emploi des constructions graphiques, levé géologique des surfaces, coupe géologique et la projection stéréographique.

Mots clés : Géologie, Roches, structure interne de la terre, minéralogie, cartographique géologique, géodynamique interne.

Abstract :

Geology is the science of the Earth. She is particularly interested in the earth's crust through its constituents, its history and its evolution.

The primary objective of the work is to offer a scientific and methodological synthesis of geology, based on the knowledge and skills acquired. It presents definitions and reminders about Geology. At the end of the module, students will have acquired a good knowledge of the formation of the earth and its internal structure, all the processes which affect the surface of the Earth.

This course is intended for second-year students in the common core Science and technology sectors: “Civil Engineering, Public Works and Hydraulics” is structured in five chapters preceded by an introduction which will lay out the objectives of geology, the constituents of the ordered world ‘l 'Universe', and the position of our planet in the solar system. The document is organized into five chapters:

In the first chapter, we present general notions, such as the definition of Geology, Division of Geology, as well as the internal structure of the earth.

The second chapter defines the basic notions of mineralogy, the presentation of different types of rocks (igneous rocks, sedimentary rocks, rocks metamorphic and loose rocks), as well as their formation cycles.

The third chapter is devoted to the presentation of the action of the different elements on rocks, namely: wind, water, and glaciers. The fourth chapter describes in brief, as well as the notions of internal geodynamics (earthquakes, volcanoes).

Finally, in the fifth chapter we deal with the adaptation of geological techniques to civil engineering needs such as geological mapping, use of constructions graphics, geological survey of surfaces, geological section and stereographic projection.

Keywords: Geology, Rocks, internal structure of the earth, mineralogy, geological cartography, internal geodynamics.