

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de : Génie Civil & Hydraulique

Polycopié de cours

GEOLOGIE



Destiné aux étudiants en 2^{ème} Année ST

Filières: « Génie Civil, Travaux Public et Hydraulique »

Elaboré par : Dr BENAMARA Fatima Zohra

Année 2022

Avant Propos

Ce polycopié de cours du module intitulé « Géologie» a été rédigé à l'intention des étudiants de deuxième année tronc commun Science et technologies Filières : «Génie Civil, Travaux Public et Hydraulique». Il répond au programme officiel du Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique. Le cours aborde toutes les notions du programme de façon structurée afin d'en faciliter la lecture et la compréhension.

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. 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,

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. Ce document est une synthèse tirée de différents ouvrages en relation avec le thème. 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. L'étudiant est alors invité à approfondir les notions diverses à travers la consultation d'une liste bibliographique proposée à la fin de l'ouvrage.

Table des Matières

	Page
Avant propos	i
Table des matières	ii
Liste des Figures	viii
Liste des Tableaux	xi
Introduction	1
CHAPITRE I: INTRODUCTION A LA GEOLOGIE	
I.1 Introduction	4
I.2 Paléontologie	4
I.3 Origine de la terre	4
I.3.1 Les étapes de la formation de la Terre	5
I.3.2 Le processus de la transformation des poussières en planète	6
I.3.3 La formation de l'eau	8
I.3.4 La formation de l'oxygène	8
I.4 Les principales disciplines de la géologie	9
I.5. Les divisions géologiques	9
I.6 La structure interne de la Terre	12
I.6.1 La structure principale	12
I.6.1.1 Croûte terrestre	12
I.6.1.1.1 La croûte continentale	12
I.6.1.1.2 La croûte océanique	12
I.6.1.2 Manteau	12
I.6.1.2.1 Le manteau supérieur	12
I.6.1.2.2 Le manteau inférieur	13
I.6.1.3 Le Noyau	13
I.6.1.3.1 Noyau externe	13
I.6.1.3.2 Noyau interne	14
I.6.2 Structures secondaires	14
I.6.2.1 Zone de subduction	14
I.6.2.2 Lithosphère et asthénosphère	15
I.7 Conclusion	15

CHAPITRE II: LES MINÉRAUX ET LES ROCHES

II.1. Les minéraux	17
II.2. Notion de minéralogie	17
II.2.1 L'atome	17
II.2.2 Les molécules	18
II.2.3 Maille et réseau cristallin	18
II.2.4 Identification des minéraux	19
II.2.4.1 Propriétés optiques	19
II.2.4.1.1 La couleur	19
II.2.4.1.2 L'Éclat	19
II.2.4.1.3 Le Trait	20
II.2.4.2 Propriétés morphologiques	20
II.2.4.2.1 La Dureté	20
II.2.4.2.2 La Densité	21
II.2.4.2.3 La Forme cristalline	21
II.2.4.2.4 Le Clivage	21
II.2.4.2.5 L'Effervescence au contact de l'acide	22
II.3. Les principaux minéraux constitutifs de l'écorce terrestre	22
II.3.1 Les grandes familles de minéraux	23
II.3.2 Proportions des minéraux et leur utilisation	28
II.4 Les principaux types de roches	29
II.4.1 Les roches ignées	30
II.4.1.1 La cristallisation fractionnée	30
II.4.1.2 Classification et nomination des roches ignées	31
II.4.1.2.1 Les roches ignées extrusives	31
II.4.1.2.2 Les roches ignées intrusives (PLUTONIQUES)	32
II.4.2 Les roches sédimentaires	32
II.4.2.1 La diagenèse	33
II.4.2.2 Classement et dénomination des roches sédimentaires.	34
II.4.2.2.1 Les terrigènes ou roches détritiques	34
II.4.2.2.2 les roches biogéniques, biochimiques ou organiques	34
II.4.2.2.3 Les roches d'origine chimique	35
II.4.2.3 Dénomination des roches sédimentaires	35
II.4.3 Les roches métamorphiques	36

II 4.3.1 Le métamorphisme de contact	36
II 4.3.2 Le métamorphisme régional et la foliation métamorphique.	37
II 4.3.3 Dénomination des roches métamorphiques	38
II 5 L'intérêt des roches et leurs utilités	32
II 5.1 Utilité des roches à l'état naturelle	39
II 5.2 Utilité des roches dans le domaine de Génie civil	39
II 5 Conclusion	40
 CHAPITRE III: ACTION DES DIFFERENTS ELEMENTS SUR LES ROCHES	
III.1. Introduction	42
III.2.1 Action de l'air (du vent) sur les roches	42
III.2.1.1 La répartition des déserts	43
III.2.1.2 Les modes de transport des particules	44
III.2.1.3 Structures des déserts	44
III.2.1.3.1 Les pavements de désert	44
III.2.1.3.2 Les champs de dunes	45
III.2.2 Action de l'eau sur les roches et ses constituants	45
III.2.2.1 L'eau participe à une désagrégation mécanique des roches	45
III.2.2.2 L'eau, un agent chimique d'altération	47
III.2.3 Action des glaciers sur les roches	50
III.2.3.1 Les paysages glaciaires	50
III.2.3.1.1 Les calottes polaires	50
III.2.3.1.2 Les glaciers alpins	52
III.2.3.2 Le travail de la glace	53
III.2.3.3 Les argiles de la Mer de Champlain: des argiles sensibles	56
III.3 Conclusion	56
 CHAPITRE IV: NOTION DE GEODYNAMIQUE	
IV.1 Introduction	58
IV.2 La géodynamique interne	58
IV.3 La tectonique des plaques	59
IV.4 Les frontières divergentes	59
IV.4. 1 Les étapes de la formation d'un océan	60

IV.5 Les frontières transformantes	61
IV.6 Les séismes	62
IV.6.1 Les type de séisme	63
IV.6.2 Les ondes sismiques et leurs caractéristiques	63
IV.6.2.1 Les ondes de volume	63
IV.6.2.1.1 Les ondes P	63
IV.6.2.1.2 Les ondes S	63
IV.6.2.2 Les ondes de surfaces	64
IV.6.2.2.1 Les ondes L	64
IV.6.2.2.2 Les ondes R	64
IV.6.3 Comportement des ondes sismiques dans le globe terrestre	65
IV.6.4 La puissance d'un séisme	66
IV.6.5 La répartition des tremblements de terre à la surface de la planète	66
IV.6.6 La répartition de la sismicité en Algérie	67
IV.7 Les volcans	68
IV.7.1 Structures et reliefs d'un volcan	69
IV.7.2 Différents types de volcans	69
IV.7.3 Origine du volcanisme	69
IV.7.3.1 Volcanisme de divergence	69
IV.7.3.2 Volcanisme de subduction	70
IV.7.3.3 Volcanisme de point chaud	70
III.8 Conclusion	71
 CHAPITRE V: ADAPTATION DES TECHNIQUES GEOLOGIQUES AUX BESOINS DU GENIE CIVIL	
V.1 Généralités et définitions	73
V.2. La carte topographique	73
V.3 Les modes de représentation du relief sur les cartes topographiques	74
V.3.1 Les hachure	74
V.3.2 Les courbes de niveau	74
V.3.2.1 Différentes types de courbes de niveau	74
V.3.2.1.1 Les courbes maîtresses	75
V.3.2.1.2 Les courbes secondaires	75
V.3.2.1.3 Les courbes intercalaires	75
V.3.2.2 La densité des courbes de niveau	75
V.3.2.3 Les points côtés	75

V.3.2.4	Caractéristiques des courbes de niveau	76
V.3.2.4.1	L'équidistante	76
V.3.2.4.2	Les cotes	76
V.3.2.4.3	Les signes des cartes	76
V.4.	La lecture de la carte	76
V.4.1	L'échelle	77
V.4.1.1	Carte à grande échelle	78
V.4.1.2	Carte à petite échelle	78
V.4.2	La légende	79
V.4.2.1	Les signes altimétriques	79
V.4.2.2	Les signes planimétriques	79
V.4.2.3	Le système d'orientation	79
V.5	Le profil topographique	80
V.5.1	Exécution du profil topographique	80
V.5.1.1	Le choix des échelles	81
V.5.2	Principe d'exécution d'un profil topographique	82
V.6	Lignes caractéristiques en courbes de niveau	83
V.6.1	Formes des versants	83
V.6.1.1	Pente constante	83
V.6.1.2	Pente régulièrement variable	85
V.6.1.3	Pentes à variation brusques	85
V.6.1.3.1	Les falaises	85
V.6.1.3.2	Sommet	86
V.6.1.3.3	Cuvettes	86
V.6.2	Formes des vallées	87
V.6.2.1	Vallée en V	87
V.6.2.2	Vallée à fond plat ou en U	87
V.6.3	Le vocabulaire topographique	87
V.6.4	Les croquis	88
V.7	La carte géologique	88
V.7.1	Éléments fondamentaux d'une carte géologique	89
V.7.1.1	Couleur	89
V.7.1.2	Notation	89
V.7.1.3	Légende géologique	90
V.7.2	Propriétés géométriques des couches	91

V.7.2.1 Notion de pendage	91
V.7.3 Coupe géologique	92
V.7.3.1 Principe de construction d'une coupe géologique	94
V.7.3.2 Représentation des figurés	95
V.7.3.3 Détermination du pendage des couches géologiques	96
V.7.3.3.1 La méthode des trois points	96
V.8. La projection stéréographique	98
V.8.1 Introduction	98
V.8.2 Principe et propriétés	98
V.8.3 Définition d'un canevas	100
V.8.4 Lecture des coordonnées angulaires d'un point	101
V.8.5 Projection d'éléments de symétrie	102
V.8.5.1 Projection d'une droite	102
V. 8.5.2 Projection d'un plan	103
V.9 Conclusion	103
V.10 Exercices d'application	104
Exercice 01	104
Exercice 02	105
Exercice 03	106
Exercice 04	107
Exercice 5	108
Exercice 6	109
Exercice 7	110

LISTE DES FIGURES

		Page
Figure I.1	Les fossiles	4
Figure I.2	L'âge de l'Univers	5
Figure I.3	La nébuleuse solaire.	6
Figure I.4	Particules de sel en apesanteur	6
Figure I.5	Les protoplanètes	7
Figure I.6	La collision de la terre et la lune	7
Figure I.7	Stromatolithes	8
Figure I.8	Les roches de Zarijini (Australie)	9
Figure I.9	Structure détaillée de la terre	12
Figure I.10	La structure interne de la terre	13
Figure I.11	Détail de la Lithosphère et de l'asthénosphère	14
Figure I.12	Résumé de la structure de la terre	15
Figure II.1	La structure NaCl	17
Figure II.2	Modèle simplifié de l'atome	18
Figure II.3	Les systèmes cristallins	18
Figure II.4	Echelle de Mohs	20
Figure II.5	Echelle de dureté relative des minéraux, échelle de Mohs	21
Figure II.6	Les plans de clivage	22
Figure II.7	Les carbonates	24
Figure II.8	Les silicates	25
Figure II.9	Le tétraèdre de base.	25
Figure II. 10	Le tétraèdre isolé	27
Figure II.11	Une chaîne simple de tétraèdres	27
Figure II.12	Les chaînes doubles de tétraèdres.	27
Figure II.13	Structure en couche de tétraèdres	28
Figure II.14	Les trois types de roches et leur relation dans la cyclicité de la formation des roches	29
Figure II.15	La suite de Bowen et les quatre types de roches ignées correspondantes	30
Figure II.16	Refroidissement du magma dans une chambre magmatique	31
Figure II.17	Les principales phases de formation des roches sédimentaires	33
Figure II.18	Processus de diagenèse: cimentation et compaction	34
Figure II.19	Détermination simplifié des roches sédimentaires	36
Figure II.20	Métamorphisme de contact	37
Figure II.21	Schématisation d'une foliation métamorphique	37
Figure II.22	Dénomination des roches métamorphiques (à gauche: roche d'origine; à droite: roche métamorphique résultantes.	38
Figure III.1	Les grands déserts du monde	42
Figure III.2	La circulation atmosphérique	43
Figure III.3	Les modes de transport des particules	44
Figure III.4	La formation des pavements de désert	45
Figure III.5	Les champs de dunes	45
Figure III.6	Transformation du granite	47

Figure III.7	Roches granitiques en Bretagne	47
Figure III.8	Les reliefs particuliers "d'entonnoirs"	48
Figure III.9	Surface du modelé karstique « Les dolines »	49
Figure III.10	Transformation du massif calcaire due à l'infiltration d'eau	50
Figure III.11	La calotte polaire de l'Antarctique	51
Figure III.12	La Groenland	51
Figure III.13	Le système glaciaire alpin	52
Figure III.14	Le modelage des vallées par les glaciers alpins	53
Figure III.15	Les principaux dépôts qui caractérisent le paysage postglaciaire	54
Figure III.16	Le niveau marin	55
Figure IV.1	Les limites des plaques rigides	58
Figure IV.2	Carte des principales plaques lithosphériques.	59
Figure IV.3	Schéma de la zone de divergence	60
Figure IV.4	Bombement de la lithosphère	60
Figure IV.5	Étirement de la lithosphère avec effondrement en escalier	61
Figure IV.6	Formation du premier plancher océanique	61
Figure IV.7	La faille transformante de San Andreas	62
Figure IV.8	Le Foyer d'un séisme	62
Figure IV.9	Les ondes de volume	64
Figure IV.10	Les ondes de surfaces	65
Figure IV.11	Evolution des ondes sismiques dans le globe terrestre	65
Figure IV.12	La sismicité du monde	67
Figure IV.13	L'activité sismique au nord de l'Algérie	68
Figure IV.14	Structures et reliefs d'un volcan	69
Figure IV.15	Volcanisme de divergence	70
Figure IV.16	Volcanisme de subduction	70
Figure IV.17	Point chaud sous un océan	71
Figure V.1	La projection des courbes de niveaux	74
Figure V.2	Différents types de courbes de niveau	75
Figure V.3	Les points côtés	76
Figure V.4	L'échelle d'une carte (E)	77
Figure V.5	L'échelle graphique	78
Figure V.6	Profil topographique	80
Figure V.7	Réalisation du profil topographique	82
Figure V.8	La rose des vents	83
Figure V.9	Pente constante	84
Figure V.10	Pente régulièrement variable	84
Figure V.11	Rupture de pente	85
Figure V.12	Abrupts (2) et falaises (3)	86
Figure V.13	Les différents figurés	86
Figure V.14	Sommets et Cuvettes : bloc-diagramme et carte	86
Figure V.15	Formes des vallées	87
Figure V.16	Les croquis	88
Figure V.17	Exemple de légende	91
Figure V.18	Pendage d'une couche	92
Figure V.19	Représentation des directions et pendages sur une carte et en coupe géologique	92
Figure V.20	Structures tabulaires A) relief plat B)Vallée	93

Figure V.21	Structures plissée	94
Figure V.22	Structure faillée	94
Figure V.23	Quelques figurés	95
Figure. V.24	Le dessin des figurés	95
Figure. V.25	Intersection d'une couche oblique au niveau d'une colline	96
Figure. V.26	Intersection d'une couche verticale au niveau d'une colline	96
Figure. V.27	Intersection d'une couche oblique avec une vallée en forme de V	97
Figure. V.28	Intersection d'une couche oblique avec une vallée en forme de V sont de sens contraire	97
Figure. V.29	Intersection d'une couche horizontale avec une vallée en forme de V	98
Figure. V.30	Projection stéréographique sur le plan équatorial	99
Figure V.31	Projections polaires et équatoriales d'une sphère	100
Figure. V.32	Abaque de Wulff : pas de 10° entre méridiens et entre parallèles	101
Figure. V.33	Lecture des coordonnées angulaires d'un point	102
Figure. V.34	Projection de droites	102
Figure. V.35	Intersection d'un plan quelconque avec une sphère	103
Figure. V.36	Projection d'un plan passant par l'origine	103

LISTE DES TABLEAUX

		Page
Tableau I.1	Les divisions et leurs repères chronologiques	11
Tableau II.1	La proportion des éléments chimiques les plus abondants dans la croûte terrestre.	22
Tableau II.2	Les principales caractéristiques des silicates.	26
Tableau II.3	Les principaux groupes des minéraux et leurs usages	28
Tableau II.4	Type de roches ignées	32
Tableau II.5	Dénomination des roches sédimentaires	35
Tableau II.6	Exemple de classification des roches sédimentaires selon la taille des grains	36
Tableau II.7	Classification des roches métamorphique basée sur des séquences métamorphiques.	38
Tableau III.1	Caractéristiques du granite sain et de l'arène granitique	46
Tableau IV.1	Echelle de mesure de l'intensité d'un séisme	59

Introduction

La géologie est la science qui étudie la Terre. Etudier la Terre signifie non seulement voir comment elle nous apparaît, mais aussi comprendre comment elle s'est formée, quelle a été sa vie, de quoi elle est construite, apprendre ce qui se passe en son centre invisible et aussi peut-être pourquoi elle a vu naître un phénomène bien particulier, la vie.

La géologie a pour but de mieux décrire et comprendre la structure et l'évolution du monde minéral, en interaction avec les enveloppes fluides et la biosphère, à toute échelle de temps et d'espace. La géologie l'est à présent intellectuellement par ses échanges avec les sciences de la vie et les sciences physiques et chimiques, dont les concepts et les résultats sont utilisés pour mieux décrire et caractériser les processus à l'œuvre sur Terre.

Les diverses branches de la géologie moderne se regroupent autour de techniques, comme la géophysique, la géochimie, la géologie de terrain, la tectonique, la pétrologie expérimentale, l'observation de la Terre depuis l'espace, ou encore la dynamique des fluides géologiques et autour de thèmes transverses faisant appel aux techniques précédentes, telles que les géosciences marines, le géomagnétisme, le volcanisme, la géodynamique, ou la planétologie comparée..

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 Sciences et de la technologie filières (Génie Civil, Travaux Public et Hydraulique). La géologie est, en effet, divisée elle-même en plusieurs domaines dont nous allons explorer les plus connus tels que la formation de la Terre, la géodynamique externe comme l'érosion et les dépôts ainsi que la géodynamique interne comme la sismologie, la volcanologie et la tectonique des plaques.

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 l'étude des minéraux, l'étude des fossiles, l'étude des roches, la tectonique des plaques, ainsi que la cartographie.

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.

*L*e document est organisé en cinq chapitres :

*D*ans le premier chapitre, on présente, des notions d'ordre général, tels que de la définition de géologie, Origine de la terre, Division de la géologie, ainsi que la structure interne de la terre

*L*e 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.

*L*e 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.

*L*e quatrième chapitre décrit en brefs, la théorie de la tectonique des plaques, définition des frontières divergentes, les frontières convergentes et les frontières transformâtes, ainsi que les notions de la Géodynamique interne (Séismes, volcans),

*E*nfin, 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. A la fin du chapitre, des exercices d'application sont proposés avec leurs solutions pour permettre à l'étudiant de tester ses connaissances.

Chapitre I : Introduction à la géologie

I. 1. Introduction

La géologie est la science dont le principal objet d'étude est la Terre. Le terme « géologie » désigne également l'ensemble des caractéristiques géologiques d'une région, et s'étend à l'étude des astres. 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.

I.2. Paléontologie

La paléontologie est une discipline conjointe à la géologie et à la biologie, dont le champ d'étude se concentre sur les êtres vivants disparus, à partir de l'analyse de fossiles, pour en tirer des conclusions sur leur évolution au cours des temps géologiques.

Les objectifs de la paléontologie sont de décrire les espèces fossilisées, afin de déterminer la relation entre les êtres vivants disparus et actuels pour réfléchir à propos de leur évolution (Fig. I.1).

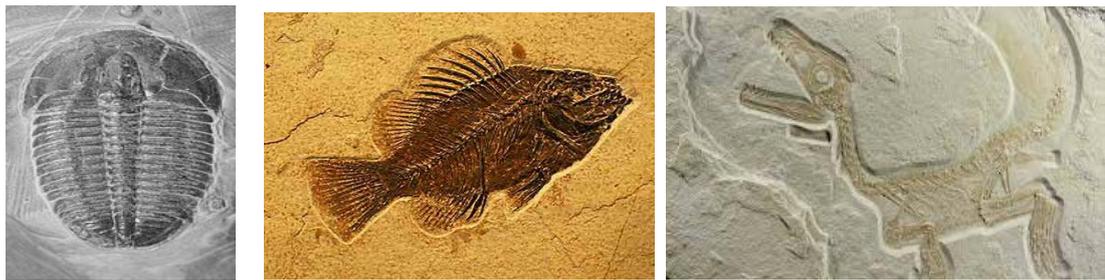


Figure I.1 *Les fossiles* [5]

I.3 Origine de la terre

Le Big Bang « Grand Boum » est utilisé par les scientifiques pour décrire l'origine et l'évolution de l'Univers [5]. Il a été initialement proposé en 1927 par Georges Lemaître, qui décrivait dans les grandes lignes l'expansion de l'Univers (Fig. I.2).

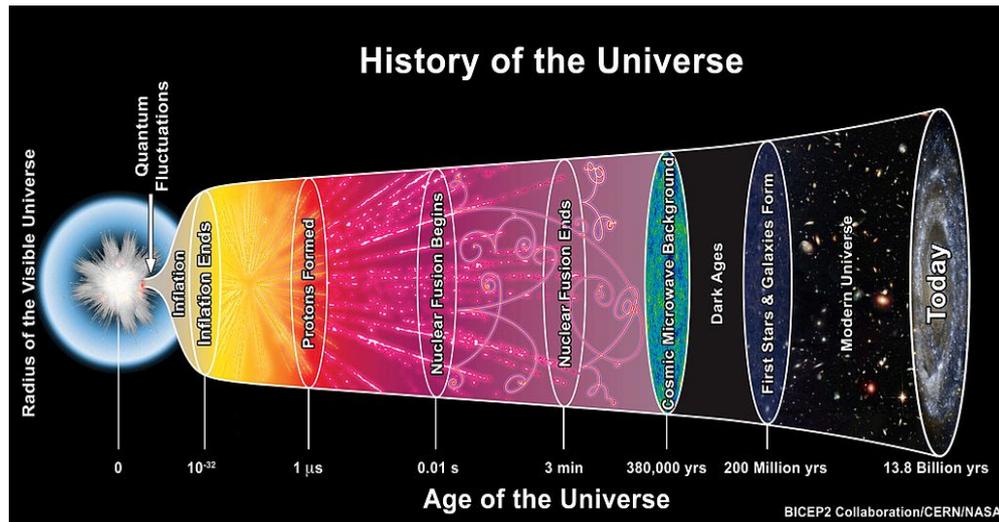


Figure I.2 L'âge de l'Univers [5]

I.3.1 Les étapes de la formation de la Terre

Il y a 5 milliards d'années, la Terre n'existait pas. A la périphérie de notre galaxie : il n'y avait qu'un vaste nuage de gaz et de poussières. A l'origine de ce nuage : l'explosion d'une supernova. Ce nuage de poussière est appelé *nuage moléculaire*. Il est formé de débris d'étoiles, ayant appartenu à un univers primitif, étoiles qui auraient explosé. Lors de l'explosion, les particules (dont des éléments lourds: fer, nickel, aluminium, silicone...) qui constituaient ces étoiles ont été vaporisées à travers toute la galaxie. Puis sous l'effet d'une force: la gravité, ces particules se sont rassemblées pour former des étoiles et des planètes.

Sous l'effet des forces gravitationnelles, les particules du nuage moléculaire se sont agglomérées, puis pendant une dizaine de millions d'années, le nuage s'est comprimé lentement sous l'effet de sa propre gravité. Cette compression a provoqué l'accroissement de la vitesse de rotation du nuage. L'énergie dégagée par l'apport de matière a réchauffé le centre du nuage. Cette boule en rotation est devenue notre Soleil (Fig. I.3).

Le reste du nuage, la nébuleuse solaire, s'est étiré pour former un disque de matière. La naissance du système solaire aurait duré 10 à 15 millions d'années.



Figure I.3 *La nébuleuse solaire.*[22]

I.3.2 Le processus de la transformation des poussières en planète

Par une expérience dans une station spatiale en apesanteur : lorsque deux cristaux de sel entrent en collision, cela crée une charge électrostatique qui les force à s'agglomérer. Si on secoue le sac plastique contenant l'amas du sel, il se désagrège mais dès que l'on arrête, l'amas se reforme (Fig. I.4).



Figure I.4 *Particules de sel en apesanteur* [22]

Cette première phase d'existence de la Terre (amas de poussières) aurait eu lieu il y a 4,5 milliards d'années.

Lorsque cet amas atteint une taille suffisante (800 mètres de diamètre), sa masse est si importante qu'il aspire la poussière présente dans le disque environnant [22].

Pendant environ trois millions d'années, dans le système solaire interne, ces amas vont se regrouper pour former une vingtaine de protoplanètes. Ces amas vont se regrouper pour former une vingtaine de protoplanètes (Fig. I.5).

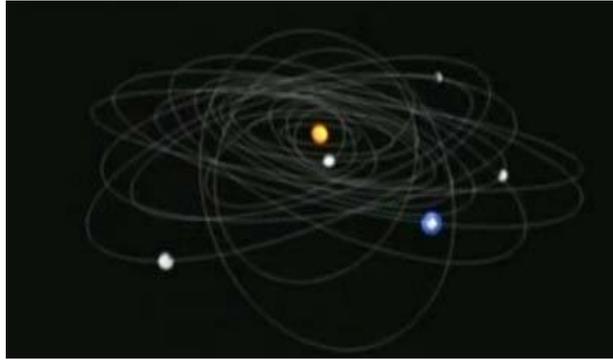


Figure I.5 *Les protoplanètes* [22]

Puis les protoplanètes entrent en collision et fusionnent pour donner quelques planètes dont Vénus, Mercure, Mars et la Terre. Notre Terre se serait formée sur une période d'environ 30 millions d'années;

La température de cette Terre primitive est d'environ 4700°C (chaleur due aux collisions). Cette Terre est donc formée de matière en fusion (Fig. I.6). Petit à petit, la Terre se refroidit, les éléments les plus légers remontant vers la surface et les plus lourds (fer) s'enfonçant pour former un noyau. La solidification du noyau interne de la Terre aurait commencé il y a 3,5 milliards d'années [22].



Figure I.6 *La collision de la terre et la lune* [22]

La Terre s'est donc refroidie jusqu'à atteindre une température de 1100°C. Alors que la Terre a environ 50 millions d'années, elle va entrer en collision avec une autre protoplanète (de la taille de Mars). Cette collision sera telle que la Terre va "fondre". Cette collision serait à l'origine de "l'éjection de la Lune". La Lune se serait formée par agglomération des résidus de roche vaporisés lors de l'impact.

Au départ la Lune était beaucoup plus proche de la Terre qu'actuellement, sa présence a engendré les marées. La collision a probablement modifié l'axe de rotation de la Terre, cette inclinaison est à l'origine des saisons. L'impact qui a donné naissance à la Lune aurait aussi

déterminé la différenciation de la Terre et son organisation en plusieurs couches. A ce stade de son histoire, la Terre ne possède toujours pas de croûte ni d'eau.

1.3.3 La formation de l'eau

L'hypothèse retenue concernant l'arrivée de l'eau sur Terre est la suivante: l'eau aurait été apportée pour moitié par une pluie de météorites provenant de l'extérieur de la ceinture d'astéroïdes. Les comètes contiennent 50% d'eau et en se désintégrant lors de leur collision avec la Terre les météorites auraient libéré de l'eau. Au fil des collisions les océans seraient apparus. L'autre moitié de l'eau terrestre aurait pour origine le dégazage du manteau. Les océans avaient mis environ 150 millions d'années à se former.

Notre Terre avait donc des océans riches en fer (de couleur verte) et son atmosphère plus dense que l'actuelle lui donnait une teinte rougeâtre. La température à la surface était certainement de l'ordre de 93°C. Les gaz qui constituent cette atmosphère primitive sont le diazote, le dioxyde de carbone et le méthane.

1.3.4 La formation de l'oxygène

C'est l'étude des stromatolithes (sont des sortes de pierres, qui sont formées par des êtres vivants marins microscopiques qui vivent en eau peu profonde) qui va fournir une explication à l'apparition du dioxygène de l'atmosphère. Ces cyanobactéries utilisent de dioxyde de carbone et la lumière et rejettent du dioxygène [22]. Cependant, le dioxygène formé par ces premiers stromatolithes ne s'est pas accumulé dans l'atmosphère car le dioxygène libéré par les stromatolithes aurait réagi avec le fer pour former de l'oxyde de fer (Fig. I.7). Les premiers océans, saturés en fer auraient absorbé le dioxygène pendant 1 milliard d'années.



Figure I.7 *Stromatolithes* [22]

Les roches de Zarijini (Australie) se seraient formées par précipitation des oxydes de fer (Fig. I.8). Durant 2,5 milliards d'années, le fer des océans est entièrement oxydé, du dioxygène commence à s'accumuler dans l'atmosphère. Au cours des 2 milliards d'années suivant, le taux de dioxygène va augmenter pour atteindre un taux nécessaire à la vie il y a 500 millions d'années.



Figure I.8 Les roches de Zarijini (Australie)

1.4 Les principales disciplines de la géologie:

Les principales disciplines de la géologie sont:

La pétrographie (étude des roches...)...

La minéralogie (étude des minéraux)...

La cristallographie (étude de la propriété de l'état cristallin de la matière)...

La sédimentologie... étudie la façon dont se déposent les sédiments...

La géochimie est l'étude du comportement chimique des éléments chimiques...

La stratigraphie est l'étude de la succession des sédiments...

La tectonique est en effet l'étude des déformations de la partie superficielle de la terre...

La paléontologie étudie les êtres fossiles

La géomorphologie étudie l'évolution des reliefs de la surface de la terre...

La géologie appliquée n'est pas à proprement parler une discipline à part entière, mais regroupe les applications pratiques de toutes les branches de la géologie (mines, pétroles, travaux publics, hydrogéologie...)...»

1.5 Les 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 XIX^e (19) siècle, en trois ères :

- Primaire,

- Secondaire,
- 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 groupes entiers d'organismes [20].

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 XIX^e 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 événements liés à l'apparition de la vie et certains événements géologiques majeurs ont été présentées au Tableau I.1 [20].

Tableau I.1 Les divisions et leurs repères chronologiques [20]

QUATERNAIRE						
CÉNOZOÏQUE	NÉOGÈNE	PLIOCÈNE	Plaisancien Zancléen Messinien	-2 Ma Homo sapiens		
		MIOCÈNE	Tortonien Serravalien Langhien Burdigalien Aquitanien	-6 Ma Glaciation Formation de la Mer Rouge Subduction de l'Inde sous l'Asie		
			OLIGOCÈNE	Chattien Stampien Priabonien	-23 Ma Arthropodes	
			ÉOCÈNE	Bartonien Lutétien Yprésien	-34 Ma	
		PALÉOCÈNE		Thanétien Danien	-55 Ma	
	MÉSOZOÏQUE	CRÉTACÉ	SUPÉRIEUR	Maastrichtien Campanien Santonien Conacien Turonien Cénomanién	-65 Ma Extinction des Dinosaures	
				INFÉRIEUR	Albien Aptien Barrémien Hauterivién Valangien Berriasien	-95 Ma Primates Formation de l'Atlantique Nord
					JURASSIQUE	SUPÉRIEUR (MALM)
			MOYEN (DOGGER)	Bathonien Bajocien Aalénien		-160 Ma Oiseaux
			INFÉRIEUR (LIAS)	Toarcién Pliensbachien Sinémurien Hettangien Rhétien		-176 Ma
TRIAS		SUPÉRIEUR		Norien Carnien	-207 Ma Mammifères	
		MOYEN	Ladinien	-230 Ma		
		INFÉRIEUR	Anisien Olnékien Indusien	-240 Ma Dinosaures		
PALÉOZOÏQUE		PERMIEN	SUPÉRIEUR	Tatarien Kazanien	-250 Ma Extinction des Trilobites	
			INFÉRIEUR	Kungurien Artinskien Sakmarien Assélien Gzhélien	-260 Ma Glaciation	
	CARBONIFÈRE	SILÉSIE	Moscovien Bashkirien Serpukhovien	-290 Ma Conifères		
			DINANTIEN	Brigantien Asbien Holkérien Arundien Chadien Ivorien Hastarien	-325 Ma Reptiles	
				DÉVONIEN	SUPÉRIEUR	Famennien Frasnien
		MOYEN	Givétien Eifélien		-375 Ma Amphibiens	
		INFÉRIEUR	Emsien Praguien Lochkovien	-390 Ma Fougères		
	SILURIEN	PRIDOLI	Pridolien	-410 Ma Poissons osseux		
		LUDLOW	Ludfordien	-415 Ma		
		WENLOCK	Gorstien	-425 Ma Plantes terrestres		
LLANDOVERY		Homérien Sheinwoodien	-430 Ma			
		Télychien Aéronien Rhuddanien	-440 Ma Glaciation			
ORDOVICIEN			-445 Ma			
			-455 Ma Poissons cuirassés			
			-462 Ma			
			-465 Ma			
			-480 Ma			
CAMBRIEN	SUPÉRIEUR	Trémadocien	-500 Ma			
	MOYEN	Mayaïen Amgaïen Lénien	-550 Ma Trilobites			
	INFÉRIEUR	Atdabanien Tommotien Paléocambrien	-550 Ma Métazoaires à enveloppe calcaire			
PRÉCAMBRIEN	PROTÉROZOÏQUE	NÉO-PROTÉROZOÏQUE		-1 Ga Métazoaires à corps mou		
		MÉSO-PROTÉROZOÏQUE		-1,6 Ga Glaciation		
		PALÉO-PROTÉROZOÏQUE		-2,6 Ga Cellules eucaryotes		
	ARCHÉEN	NÉOARCHÉEN		-2,8 Ga Algues unicellulaires (Gun Flint)		
		MÉSOARCHÉEN		-3,2 Ga Stromatolites		
		PALÉOARCHÉEN		-3,6 Ga Bactéries anaérobies		
		ÉOARCHÉEN		-4,6 Ga Formation de la Terre		

I.6 La structure interne de la Terre

I.6.1 La structure principale

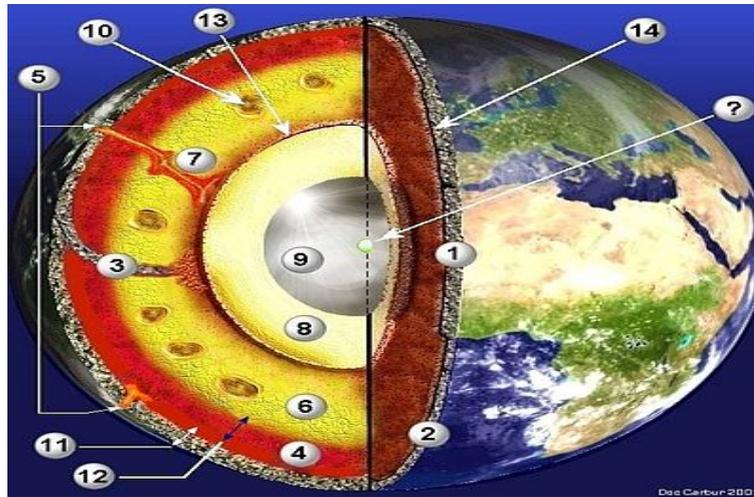


Figure I.9 Structure détaillée de la terre [21]

I.6.1.1 Croûte terrestre

I.6.1.1 La croûte continentale

La croûte continentale (1) solide, épaisseur moyenne (30 à 70 km) essentiellement granitique et surmontée par endroits de roches sédimentaires (Fig. I.9). Elle est plus épaisse que la croûte océanique (Fig. I.9). La croûte terrestre représente environ 1,5 % du volume de la Terre solide, 4,4 % de la masse terrestre et 6,5 % de la masse silicatée de la Terre. Elle était anciennement appelée SIAL (silicium + aluminium) [21].

I.6.1.1.2 La croûte océanique

La croûte océanique (2) solide, essentiellement composée de roches basaltiques. Relativement fine (environ 5 à 15 km). Elle est également appelée SIMA (silicium + magnésium).

I.6.1.2 Manteau

Le manteau, qui constitue le gros du volume terrestre, 82%, son épaisseur est de 2900 km et qui se divise en manteau inférieur solide et manteau supérieur principalement plastique [7].

I.6.1.2.1 Le manteau supérieur

Il est moins visqueux (4) (plus « ductile ») que le manteau inférieur (Fig. I.9) : les contraintes physiques qui y règnent le rendent en partie *plastique*, mais dont la partie tout à fait supérieure

est solide (jusqu'à 700km). Il est formé essentiellement de roches telles que la péridotite. La discontinuité de Mohorovicic (14) marque la transition entre la croûte et le manteau.

I.6.1.2.2 Le manteau inférieur

Le manteau inférieur (6): solide (700à 2900km) le manteau est peu riche en silice mais très riche en magnésium (MgO). Par opposition au SIAL, le manteau du point de vue chimique être dénommé SIMA (pour silice et Magnésium)

La raison principale de l'état solide des matériaux mantelliques est que, quand on s'enfonce dans le manteau, l'effet de pression, qui maintient l'état solide, augmente plus rapidement que l'effet de température, qui provoque la fusion [7].

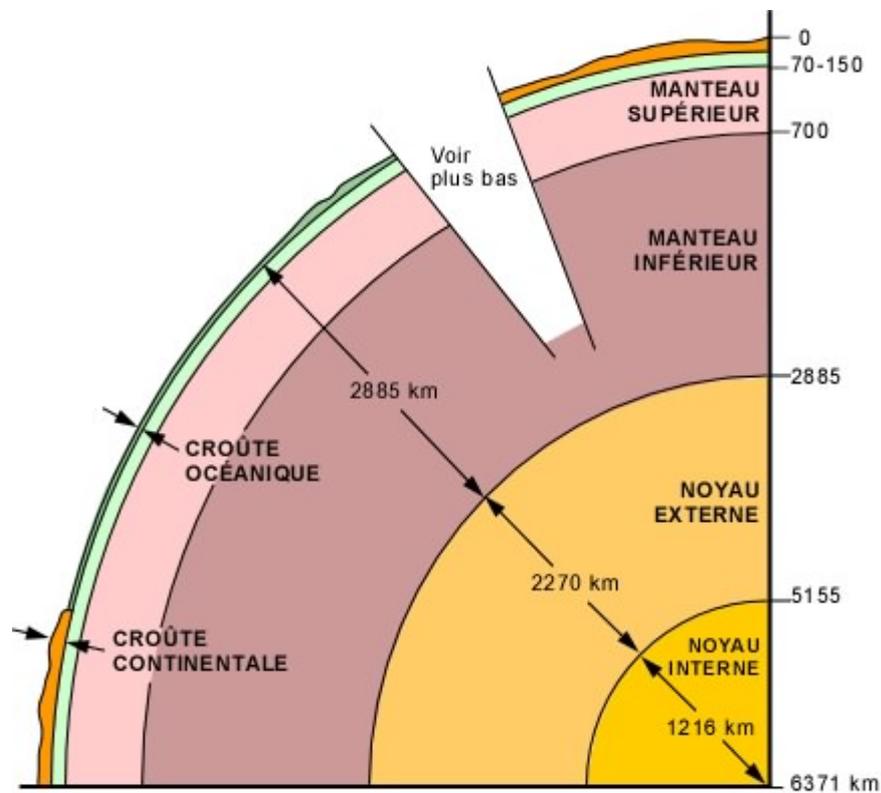


Figure I.10 La structure interne de la terre [21]

I.6.1.3 Le Noyau

On distingue le noyau externe et noyau interne. Ils représentent 17 % du volume terrestre.

I.6.1.3.1 Noyau externe

Le noyau externe (8) (jusqu'à 5155km) est liquide. Il est essentiellement composé de fer à 80-85 %, d'environ 10-12 % d'un élément léger non encore déterminé parmi le soufre, l'oxygène, le silicium et le carbone (ou un mélange des quatre), et enfin de l'ordre de 5 % de nickel. Sa viscosité est estimée entre 1 et 100 fois celle de l'eau, sa température moyenne atteint 4000 °C et

sa densité 10. La Discontinuité de Gutenberg (13) marque la transition entre le manteau et le noyau (Fig. I.10).

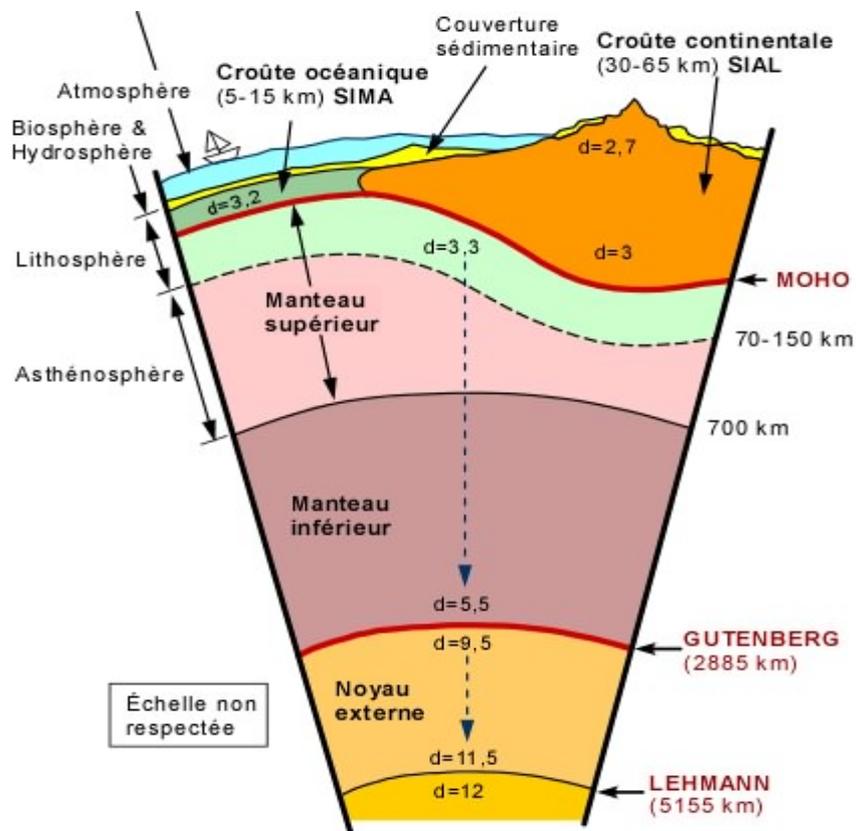


Figure I.11 Détail de la Lithosphère et de l'asthénosphère [21]

I.6.1.3.2 Noyau interne

Le noyau interne (9) solide (également appelé « graine ») est essentiellement métallique (alliage de fer et de nickel principalement, en proportions environ 80 %-20 %) il porte le nom abrégé NIFE et constitué par cristallisation progressive du noyau externe. La pression, qui est de 3,5 millions de bars (350 GPa), le maintient dans un état solide malgré une température supérieure à $6000\text{ }^{\circ}\text{C}$ et une densité d'environ 13. La Discontinuité de Lehmann marque la transition entre le noyau externe et le noyau interne (Fig. I.11).

I.6.2 Structures secondaires

I.6.2.1 Zone de subduction

Une zone de subduction (3) présente une plaque qui s'enfonce dans le manteau, parfois jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres.

I.6.2.2 Lithosphère et asthénosphère

a. La lithosphère (11) est l'enveloppe solide de la Terre. Elle englobe tous les éléments du relief: montagnes, plaines, plateaux, volcans est constituée de la croûte (plaques tectoniques) et d'une partie du manteau supérieur [6]. La limite inférieure de la lithosphère se trouve à une profondeur comprise entre 100 et 200 kilomètres, à la limite où les péridotites approchent de leur point de fusion. Elle comprend la discontinuité de Mohorovicic (14).

b. L'asthénosphère (12) est la zone en dessous de la lithosphère. Un résumé de la structure de la terre est présenté sur la Figure 1.12

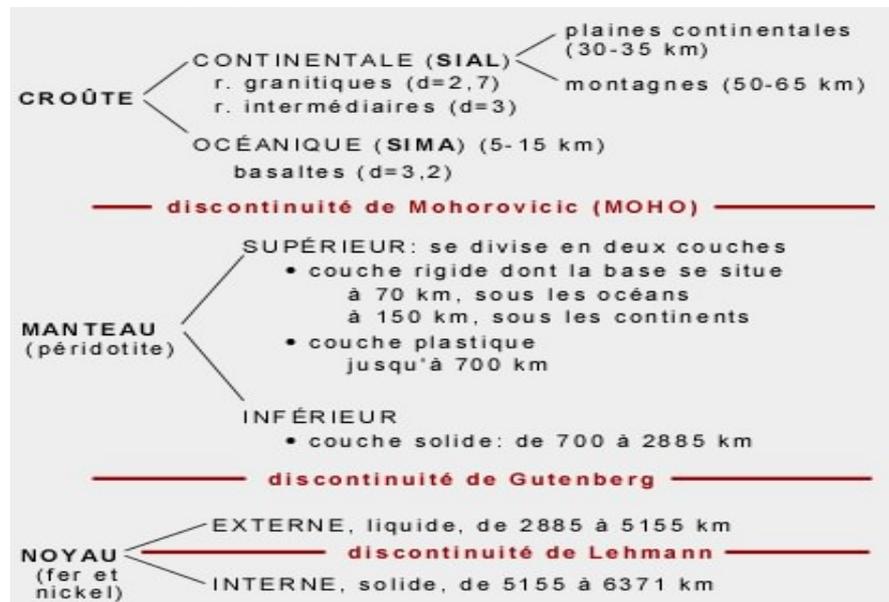


Figure I.12 Résumé de la structure de la terre [21]

II 7 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 géologie. 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

II.1 Les minéraux

Un minéral est une substance formée naturellement ou synthétisée artificiellement. Les minéraux sont généralement solides dans les conditions normales de température et de pression et s'associent pour former les roches constituant la croûte terrestre et, d'une façon plus générale, la lithosphère (Les minéraux sont donc les matériaux élémentaires des roches de la croûte terrestre).

Les minéraux se sont constitués d'atomes et de molécules, et se définissent sur deux critères indissociables : la composition chimique et la structure atomique. En simplifiant, on peut dire que le minéral, c'est la matière ordonnée [17].

Un exemple simple : la minérale halite sa composition chimique est NaCl, le chlorure de sodium (le sel de table).

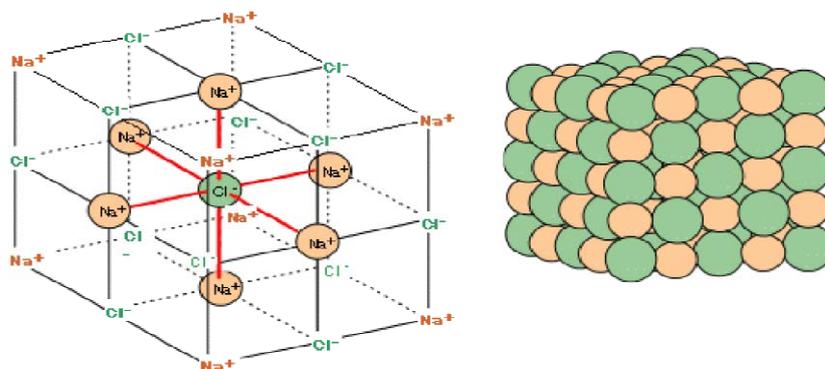


Figure II.1 La structure NaCl [17]

Il possède une structure atomique qu'on appelle cubique parce que l'arrangement des atomes, en alternance régulière entre les Cl et les Na, forme une trame cubique comme le montre ce modèle (Fig. II.1).

Les matériaux de notre planète sont constitués d'éléments chimiques, comme l'hydrogène, l'oxygène, le fer, le nickel, etc.... Ces éléments sont formés par des atomes, l'unité de base de la matière.

II.2 Notion de minéralogie

II.2.1 L'atome

Elle consiste en un noyau central composé de protons (charges positives) et de neutrons (aucune charge), entouré d'électrons (charge négative) qui gravitent autour du noyau. Toute la masse est concentrée dans le noyau, les électrons ayant une masse négligeable. La masse atomique d'un

atome est donc donnée par la masse du noyau, soit le nombre de protons + le nombre de neutrons (Fig. II.2).

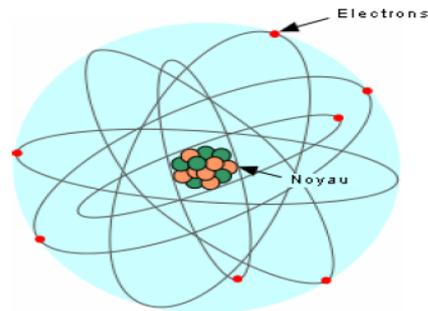


Figure II.2 Modèle simplifié de l'atome [17]

II.2.2 Les molécules

Ce sont formées d'un assemblage d'atomes qui sont liés entre eux par deux principaux types de liens: les liens ioniques et les liens covalents.

II 2.3 Maille et réseau cristallin

La maille est l'enveloppe du plus petit parallélépipède de matière cristallisée conservant toutes les propriétés géométriques, physiques et chimiques du cristal et contenant suffisamment d'atomes pour respecter sa composition chimique. Pour construire un volume de cristal.

Un cristal est un solide minéral naturel homogène aux formes régulières, limité par des surfaces habituellement planes faisant entre elles des angles bien définis.

On distinguera 7 systèmes cristallins/ conditionnés par les relations de symétries de la maille cristalline et l'organisation des réseaux cristallins (Fig. II.3) :



Figure II.3 Les systèmes cristallins [11]

Tous les minéraux de la création auront des formes rapportées à l'un de ces systèmes :

Ex:

- Le Quartz est rhomboédrique
- Le diamant est cubique
- Le saphir est cubique
- L'émeraude est hexagonale

II 2.4 Identification des minéraux

Les minéraux possèdent des propriétés physiques qui permettent de les distinguer entre eux. Souvent il faut plusieurs critères à la fois pour faire la différence c'est pourquoi on distinguera deux propriétés :

II.2.4.1 Propriétés optiques

Les minéraux ont des comportements spécifiques quand ils sont traversés par les rayons de lumière. Ils réfléchissent, absorbent et réfractent certaines longueurs d'ondes selon les propriétés de leurs systèmes cristallins, couleur, éclat, trait, transparence, fluorescence, etc. [16]

II.2.4.1.1 La couleur

Ce n'est pas un critère facile à utiliser car les minéraux présentent une grande variété de couleurs. Un même minéral peut présenter plusieurs couleurs différentes. Par exemple, le quartz présente plusieurs couleurs, de l'incolore limpide (cristal de roche), au blanc laiteux, au violet (améthyste), au rouge (jaspe), au noir enfumé, au bleu. Il existe aussi des minéraux qui ont la même couleur apparente mais qui sont tout à fait différents en composition chimique (ex, les minéraux couleurs or comme la pyrite, dite or des fous, la chalcopyrite, l'or natif ...etc.).

Il faut noter qu'en raison de l'altération superficielle inévitable des roches, la couleur doit être observée sur une cassure fraîche. Il ne faut donc pas se fier à la couleur extérieure apparente de la roche [16].

II.2.4.1.2 L'Éclat

C'est le reflet présenté par le minéral lorsque celui-ci est exposé à la lumière. Il existe deux types principaux [18]:

- ↳ l'éclat métallique, brillant comme celui des métaux,
- ↳ l'éclat non métallique que l'on décrit par des termes :

Vitreux: comme le verre.

Gras: comme si la surface était enduite d'huile ou de graisse

Adamantin : qui réfléchit la lumière comme le diamant

Résineux : comme la résine,

Soyeux : comme la soie

II.2.4.1.3 Le Trait

On a remarqué que certains minéraux changent de couleur lorsqu'ils sont broyés ou frottés à une surface non lisse. C'est pourquoi on a utilisé cette propriété, appelée 'le trait' pour identifier les minéraux. Son principe est simple, il suffit de frotter le minéral sur une plaque de porcelaine blanche non émaillée. La couleur du trait laissé par ce frottement est dite le trait du minéral étudié. A défaut de porcelaine on peut utiliser toute autre surface ayant des propriétés semblables [16].

II.2.4.2 Propriétés morphologiques

Forme, clivage, dureté, densité, touché, solubilité à l'acide, magnétisme, autres (goût, température de fusion, radioactivité, etc.)

II.2.4.2 .1 La Dureté

Certains minéraux sont très durs, comme le diamant, d'autres sont tendres ou très tendres, comme la craie ou le talc. La dureté varie d'un minéral à l'autre. Elle est définie comme étant sa résistance à la rayure par un corps extérieur. Il existe pour cela une échelle de dureté relative, appelée échelle de Mohs (minéralogiste autrichien), qui utilise dix minéraux communs, classés du plus tendre au plus dur, de 1 à 10 (Fig. II.4 et II.5)

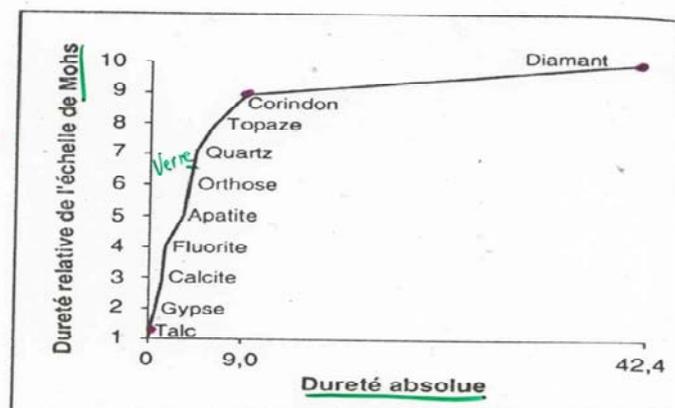


Figure II.4 Echelle de Mohs [11]

DURETE		
Rayés par l'ongle	1	Talc
Rayés par une pièce en cuivre de un cent	2	Gypse
	3	Calcite
Rayés par la lame d'acier d'un canif	4	Fluorite
	5	Apatite
Rayent le verre	6	K-feldspath
	7	Quartz
	8	Topaze
	9	Corindon
	10	Diamant

Figure II.5 Echelle de dureté relative des minéraux, échelle de Mohs [13]

II.2.4.2 .2 La Densité

En principe elle est mesurée au laboratoire avec les appareils et les manipulations adéquates. En général, les minéraux de l'écorce terrestre ont une densité moyenne de 2.7. Mais certains minéraux ont une densité relativement faible, ou relativement élevée. Par exemple le sel a une densité de 2.1 et la galène (sulfure de plomb PbS) ou l'or natif (Au) ont des densités de 7.5 et 19.3 respectivement .

II.2.4.2 .3 La Forme cristalline

Tout minéral possède son propre système cristallin dans lequel il cristallise toujours lors de sa formation. Si les minéraux sont assez grands et développés, il sera facile d'identifier leur système cristallin à l'œil nu, sinon on a recours à des moyens plus poussés comme la loupe ou le microscope optique [11].

Par exemple : le quartz cristallise dans le système hexagonal, la halite (sel) cristallise dans le système cubique, la calcite (calcaire) cristallise dans le système rhomboédrique...etc.

II.2.4.2.3 Le Clivage

Le clivage est une propriété très importante de certains minéraux. C'est un défaut naturel dans leur structure cristalline. Pour être plus précis, il s'agit de plans de faiblesse au sein de la structure cristalline qu'on appelle clivages. Noter qu'il existe aussi des minéraux qui ne présentent aucun plan de clivage, c'est pourquoi ils sont réputés très résistants, comme la silice.

Un minéral avec clivage présentera toujours le même clivage quelque soit sa taille. Quand il est soumis à des contraintes externes, le minéral avec clivage va se briser facilement le long des plans de clivage, alors qu'il ne se brisera pas selon ses autres faces cristallines [11].

Par exemple : si on frappe avec un coup de marteau un cristal de calcite (plans de clivage à 75° et 105°) on obtiendra toujours les mêmes angles entre les faces des morceaux 75° et 105°, quelle que soit la dimension du cristal (Fig. II.6).

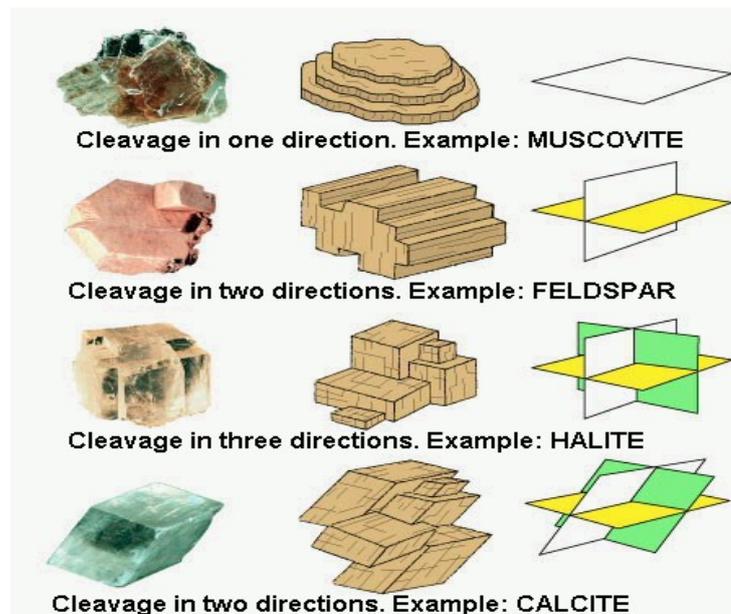


Figure II.6 Les plans de clivage. [18]

II.2.4.2.4 L'Effervescence au contact de l'acide

Généralement les minéraux carbonatés (calcaires) ou contenant des carbonates réagissent énergiquement au contact d'une solution acide. Cette réaction chimique dégage rapidement une quantité de bulles de gaz carbonique d'autant plus importante que l'acide est fort. Cette réaction est appelée effervescence, elle se produit, sur la masse minérale, ou sur la poussière, à froid ou à chaud. L'effervescence au contact de l'acide est un moyen simple et très pratique pour identifier la présence de calcaire [18].

II.3. Les principaux minéraux constitutifs de l'écorce terrestre

Lors de la formation de la terre les éléments légers remontés vers la surface (O et Si) (74,3% des matériaux) et les éléments lourds, vers le centre de la Terre (Fe, Ni).

Le tableau II.1 présente la proportion des éléments chimiques les plus abondants dans la croûte terrestre.

Tableau II.1 La proportion des éléments chimiques les plus abondants dans la croûte terrestre. [13]

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

II.3.1 Les grandes familles de minéraux

Les minéraux sont rangés en 10 classes, notées en chiffres romains.

Classe I : Les éléments natifs

L'élément natif est un corps chimique qui ne peut se décomposer en corps plus simple. Il représente 3 à 4% des espèces. Les métaux existent sous forme d'éléments natifs (constituant pur) ou, plus généralement, d'alliages. On les divise en trois sous-classes :

- Métaux natifs : or (Au), argent (Ag), cuivre (Cu), platine (Pt), ...
- Semi-métaux : le bismuth (Bi), l'antimoine (Sb), l'arsenic (As), ...
- Métalloïdes : carbone (C), soufre (S), ...

Classe II : Les sulfures et dérivés

Ils représentent 15 à 20% des minéraux. De nombreux minerais sont des sulfures. Ils sont répartis en deux groupes [34]:

- Les sulfures, arséniures, antimoniures, tellurures : le groupement anionique ne contient que du soufre, les plus courants étant la pyrite (FeS_2) et la galène (PbS_2)
- Les sulfosels : Le groupement anionique est composé de soufre et d'un autre métal.

Classe III : Les halogénures

Le groupe anionique des halogénures sont des halogènes. Cette classe représente 5 à 6% des espèces minérales. Le plus connu est sans doute la halite (NaCl), ou sel gemme. Les halogénures sont fragiles, légers et souvent solubles dans l'eau. [34]

Classe IV : Les oxydes et hydroxydes

La quatrième classe regroupe les minéraux dont le groupe anionique est constitué d'oxygène ou d'hydroxyle ($[\text{OH}]$). 14% des minéraux sont des oxydes. On les divise en trois sous-classes :

- Les oxydes simples : l'hématite (Fe_2O_3), minéral de fer.
- Les oxydes multiples : le spinelle (MgAl_2O_4) utilisé en joaillerie en substitution du rubis.
- Les hydroxydes

Classe V : Carbonates et nitrates : Ces minéraux se caractérisent par leur fragilité et une faible dureté. On distingue deux sous-classes :

- **Carbonates** c'est un minéral qu'on retrouve fréquemment à la surface du globe. Ils sont un des principaux constituants des roches sédimentaires (exemple : les calcaires, ce qu'on appelle communément la pierre à chaux). Leur structure est relativement simple comparée à celle des silicates: des complexes négatifs $(\text{CO}_3)^{2-}$, liés par des ions positifs tels Ca, Mg, Fe. Chez la calcite, CaCO_3 , les $(\text{CO}_3)^{2-}$ sont liés par des Ca^{2+} pour former une structure rhomboédrique typique de ce minéral (Fig. II.7).

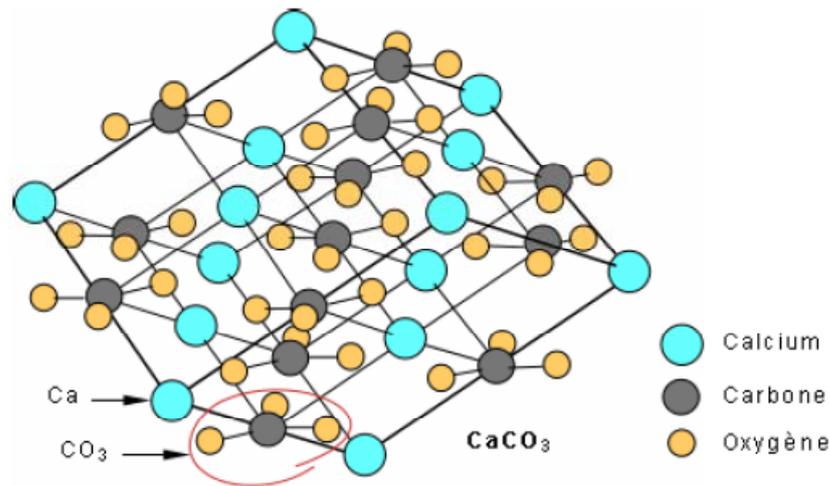


Figure II.7 Les carbonates [34]

Le groupement anionique est le groupe carbonate $[\text{CO}_3]^{2-}$. Ils représentent 9% des espèces connues. Parmi elles, des espèces importantes, comme la calcite (CaCO_3), qui est le constituant principal du calcaire.

- Nitrates : Le groupement anionique est l'ion nitrate $[\text{NO}_3]^-$.

Classe VI : Borates

Le groupement anionique est soit l'ion borate $[\text{BO}_3]^{3-}$ soit l'ion $[\text{BO}_4]^{5-}$. Cette petite famille représente 2% des minéraux.

Classe VII : Sulfates et dérivés

Cette classe représente 10% des minéraux et se définit par le groupement anionique de forme $[\text{XO}_4]^{2-}$. [34]

- Sulfates : $[\text{SO}_4]^{2-}$. Le sulfate le plus connu est sans aucun doute le gypse, la pierre à plâtre ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Chromates: $[\text{CrO}_4]^{2-}$; Tungstates : $[\text{WO}_4]^{2-}$; Molybdates : $[\text{MoO}_4]^{2-}$

Classe VIII : Phosphates et dérivés

Cette classe regroupe 16%. Le groupe anionique est de forme $[\text{XO}_4]^{3-}$.

- Phosphates : $[\text{PO}_4]^{3-}$, Arsénates : $[\text{AsO}_4]^{3-}$, Vanadates : $[\text{VO}_4]^{3-}$

Classe IX : Silicates

Composé à lui seul 95% du volume de la croûte terrestre. L'unité de base du minéral est l'ion silicate $[\text{SiO}_4]^{4-}$. Les silicates représentent plus d'un quart des minéraux à la surface du globe. Cette abondance a amené à une classification spécifique. Celle-ci fait intervenir des notions structurales, c'est-à-dire fonction de l'enchaînement des tétraèdres $[\text{SiO}_4]$. [34]

Tous les silicates possèdent une structure de base composée des ions Si^{4+} et O^{2-} (Fig. II.8)

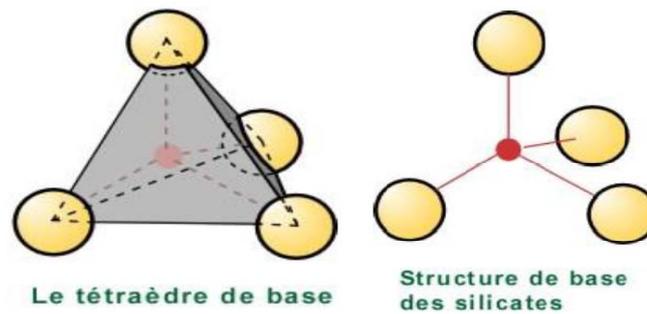


Figure II.8 *Les silicates* [34]

Si on relie les centres des oxygènes, on obtient un volume qui forme un tétraèdre, le **tétraèdre de base** (schéma de droite). Le silicium occupe le centre du tétraèdre. Le calcul des charges électriques montre qu'un tétraèdre est chargé négativement.

Le bilan des charges

Oxygène (O ²⁻)	:	4 x - 2 =	- 8
Silicium (Si ⁴⁺)	:	1 x + 4 =	+ 4
			excès - 4

A des fins de simplification dans la construction de modèles, on représente ainsi le tétraèdre de base (Fig. II.9) [34]

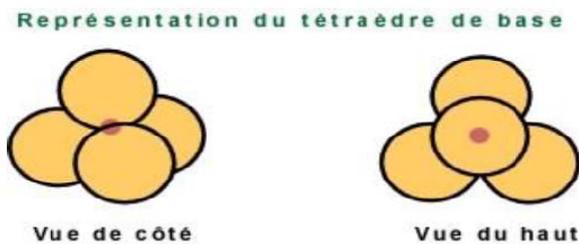


Figure II.9 *Le tétraèdre de base.*

Le tableau II.2 présente les principales caractéristiques des silicates.

Tableau II.2 Les principales caractéristiques des silicates.

MINÉRAL		FORMULE CHIMIQUE IDÉALISÉE	CLIVAGE	RÉSEAU CRISTALLIN
Olivine		$(\text{Mg, Fe})_2\text{SiO}_4$	Aucun	Tétraèdre isolé (B)
Groupe des pyroxènes		$(\text{Mg, Fe})\text{SiO}_3$	2 plans à angle droit	Chaîne simple (C)
Groupe des amphiboles		$(\text{Mg, Fe})_7\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	2 plans (60° et 120°)	Chaîne double (D)
Micas	Muscovite	$\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	1 plan	Couche planaire (E)
	Biotite	$\text{K}(\text{Mg, Fe})_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$		
Feldspath	Orthoclase	KAlSi_3O_8	2 plans à 90°	Réseau en 3 dimensions
	Plagioclase	$(\text{Ca, Na})\text{AlSi}_3\text{O}_8$		
Quartz		SiO_2	Aucun	

Les silicates sont divisés en 6 sous-classes.

- **Les néosilicates** : représentent 5% environ des espèces minérales. On y retrouve l'olivine $(\text{Mg, Fe})_2\text{SiO}_4$, les grenats et les topazes.
- **Les sorosilicates** : représentent 3% environ des espèces minérales. Parmi elles, l'épidote.
- **Les cyclosilicates** : ils ne représentent que 2% des espèces minérales, celles-ci sont très connues comme pierres gemmes. Il y a d'abord tous les béryls : aigue-marine, émeraude, et toutes les tourmalines.
- **Les inosilicates** : représentent 4,5% environ des espèces minérales. Les deux grandes familles sont les pyroxènes et les amphiboles
- **Les phyllosilicates** On distingue donc plusieurs familles : les micas, les argiles et les serpentines. Les phyllosilicates représentent 6,5% environ des espèces.
- **Les tectosilicates** : La formule chimique de base est donc SiO_2 comme pour le quartz. Le nombre et la nature des substitutions déterminent les familles des feldspaths, des feldspathoïdes et des zéolites. Les tectosilicates : représentent 4% des minéraux.

Dans les minéraux, les charges doivent être neutres. Il y a deux façons de neutraliser les charges: lier ensemble les tétraèdres par leurs oxygènes (liens tétraèdre à tétraèdre), ou ajouter des ions positifs, comme des fer, des magnésium, ou des potassium (liens métalliques).

Dans le cas de tétraèdres isolés, la structure est chargée à -4, dans le calcul des charges; les traits rouges illustrent ici les pôles négatifs correspondant aux 4 oxygènes (Fig. II.10)

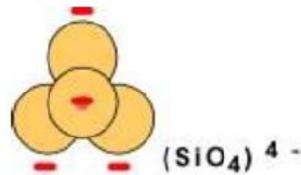


Figure II.10 *Le tétraèdre isolé*

Lorsque chaque tétraèdre partage un oxygène (en bleu sur le schéma qui suit), on obtient une **chaîne simple** de tétraèdres (Fig. II.11) [34]. Il en résulte que pour chaque tétraèdre deux charges négatives ont été neutralisées et qu'il en reste deux autres à neutraliser (les traits rouges); la structure est chargée à -2.

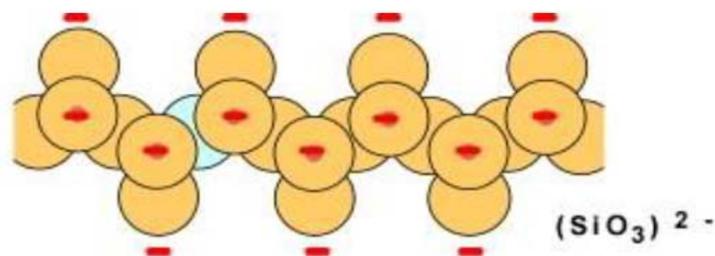


Figure II.11 *Une chaîne simple de tétraèdres.* [34]

Lorsque deux chaînes simples s'unissent par leurs oxygènes (en bleu sur le schéma qui suit) pour former **des chaînes doubles** (Fig. II.12), on obtient une structure de formule générale Si_4O_{11} , chargée à -6.

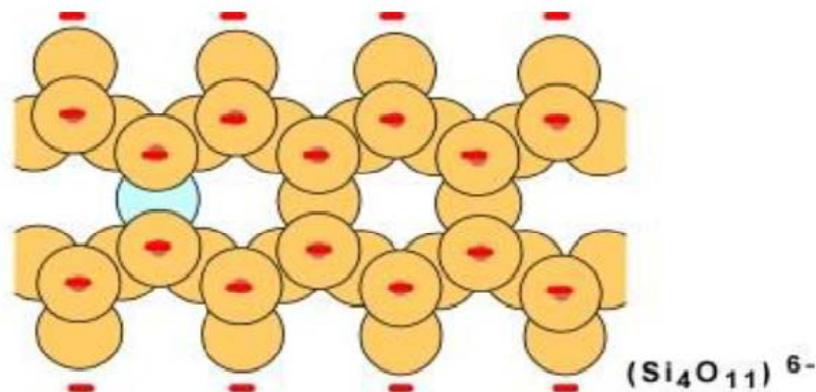


Figure II.12 *Les chaînes doubles de tétraèdres.* [34]

Lorsque des chaînes doubles s'unissent, chaque tétraèdre partage trois oxygènes (en bleu sur le schéma qui suit); la formule générale est Si_4O_{10} avec une charge de -4. On aura une structure en couche (Fig. II.13).

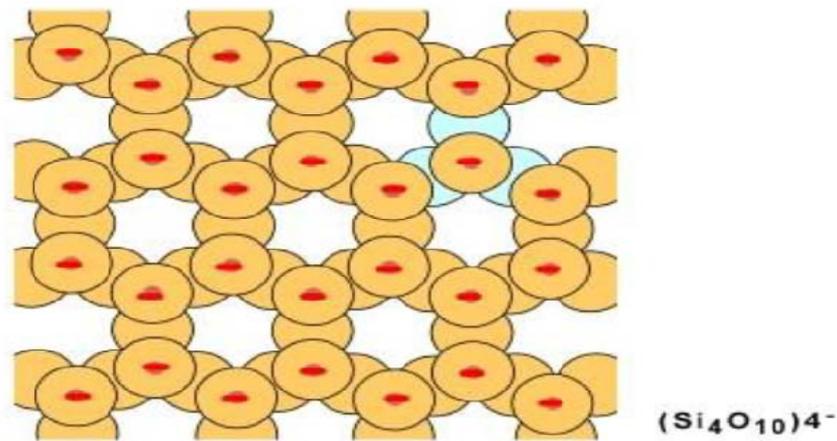


Figure II.13 Structure en couche de tétraèdres.

II.3.2 Proportions des minéraux et leur utilisation

Le tableau II.3 présente les minéraux les plus communs dans les principaux groupes et leurs usages.

Tableau II.3 Les principaux groupes des minéraux et leurs usages. [34]

GROUPE	MINERAL	FORMULE	USAGES
Éléments 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
Oxydes	Platine	Pt	Alliages, catalyseurs
	Hématite	Fe ₂ O ₃	Minéral de fer
Sulfures	Magnétite	Fe ₃ O ₄	Minéral de fer
	Corindon	Al ₂ O ₃	Gemme, abrasif
	Galène	PbS	Minéral de plomb
Sulfates	Sphalérite	ZnS	Minéral de zinc
	Pyrite	FeS ₂	« or des fous »
	Chalcopyrite	CuFeS ₂	Minéral de cuivre
	Bornite	Cu ₅ FeS ₄	Minéral de cuivre
	Cinabre	HgS	Minéral de mercure
Carbonates	Gypse	CaSO ₄ .H ₂ O	Plâtre et placo-plâtre (panneaux)
	Anhydrite	CaSO ₄	Plâtre et placo-plâtre (panneaux)
	Baryte	BaSO ₄	Boue de forage
Silicates	Calcite	CaCO ₃	Ciment Portland
	Dolomite	CaMg(CO ₃) ₂	Ciment Portland
	Malachite	Cu ₂ (OH) ₂ CO ₃	Minéral de cuivre, joaillerie
	Azurite	Cu ₂ (OH) ₂ (CO ₃) ₂	Minéral de cuivre, joaillerie
	Rhodocrosite	MnCO ₃	Joaillerie
Halogénures	Quartz	SiO ₂	Verres, horlogerie, calculatrices
	Talc	Mg ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	Poudre pour bébé
	Amiante	Mg ₆ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₆	Isolant
	Kaolinite	Al ₂ Si ₂ O ₇ (OH) ₄	Céramiques
Hydroxydes	Halite	NaCl	Sel commun
	Fluorite	CaF ₂	Fabrication des aciers
	Sylvite	KCl	Fertilisant (agriculture)
Hydroxydes	Limonite	FeO(OH).nH ₂ O	Minéral de fer, pigment
	Bauxite	Al(OH) ₃ .nH ₂ O	Minéral d'aluminium

II.4 Les principaux types de roches

L'étude des processus et des phénomènes de formation et d'érosion qui ont constamment lieu sur la croûte terrestre a conduit les scientifiques à classer les roches selon trois grandes familles [10]. Ces trois familles de roches sont à la fois bien distinctes mais elles sont aussi très liées. Distinctes par leurs caractéristiques minéralogiques et physico-chimiques, et liées par leur appartenance au même cycle de formation et de transformation des roches dans la lithosphère (Fig. II.14) [15].

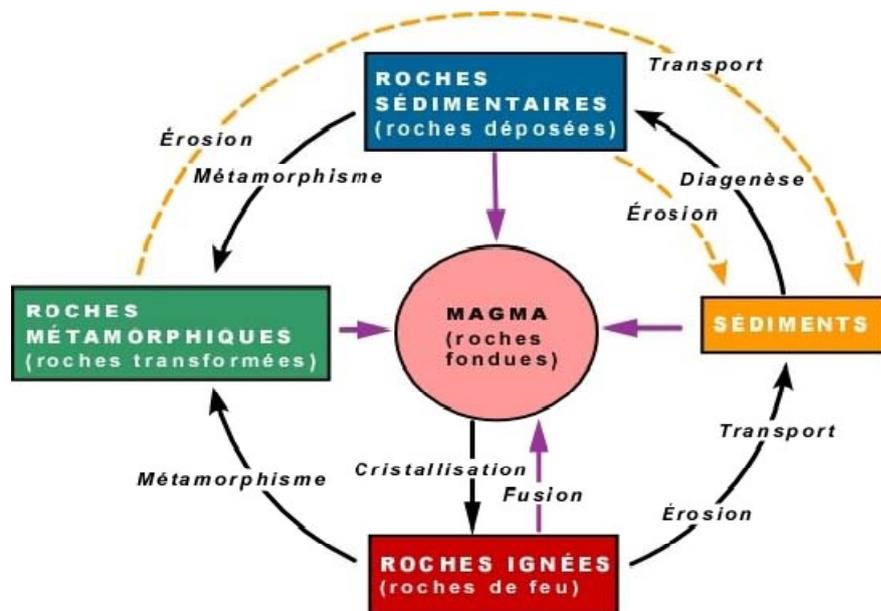


Figure II.14 Les trois types de roches et leur relation dans la cyclicité de la formation des roches [15]

On admet que c'est le magma qui est à l'origine de la formation de la croûte terrestre par refroidissement, au niveau des dorsales océaniques, des zones de subduction, des points chauds...etc.

- *La première phase du cycle*: est constituée par le refroidissement et la cristallisation du magma. On parle de roches ignées, c'est-à-dire qui viennent du feu. C'est l'un des trois grands types de roches dont on va parler dans ce chapitre. Lorsqu'elles sont amenées à la surface du globe par les processus de géodynamique interne (tectonique des plaques, formation des chaînes de montagnes...) les roches ignées sont rapidement attaquées par les processus de la géodynamique externe (érosion). Les roches ignées s'altèrent et se désagrègent, au fil du temps pour donner des particules de différentes tailles.
- *La deuxième phase* : les particules sont transportées et encore modifiées pour être déposées sous forme de dépôts meubles (sols, gravier, sable, boue...). Ces sédiments

peuvent se consolider avec le temps sous l'accumulation d'autres sédiments pour donner progressivement naissance à une roche plus ou moins solide. Ce type de roches et ces sédiments forment un autre type de roches appelé roches sédimentaires, c'est-à-dire « roches qui se sont déposées » [15].

- *La troisième phase*: sous l'effet de haute température et/ou de haute pression tous les types de roches peuvent changer (formule chimique et minéralogique) pour donner naissance à un troisième type de roches appelées roches métamorphiques « roches ayant changé de forme ».

II.4. 1 Les roches ignées

Les roches ignées proviennent du refroidissement ou cristallisation du magma lorsqu'il s'échappe de l'asthénosphère. On parle aussi de roches magmatiques. Cependant le refroidissement du magma dépend des conditions du milieu dans lequel il a lieu, en profondeur ou en surface. Si le refroidissement se fait lentement, c'est-à-dire dans les profondeurs de la lithosphère on parle de cristallisation fractionnée [12].

II.4.1.1 La cristallisation fractionnée

Le refroidissement lent du magma permet la cristallisation des minéraux dans un ordre bien défini par Bowen (Fig. II.15). Il se produit, des assemblages minéralogiques différents et ordonnés: ultramafiques, mafiques, intermédiaires et felsiques. Ces quatre types de compositions minéralogiques définissent logiquement quatre grandes sous-classes de roches ignées.

Exemple: Refroidissement du magma dans la lithosphère, dans un vide appelé chambre magmatique (Fig. II.16).

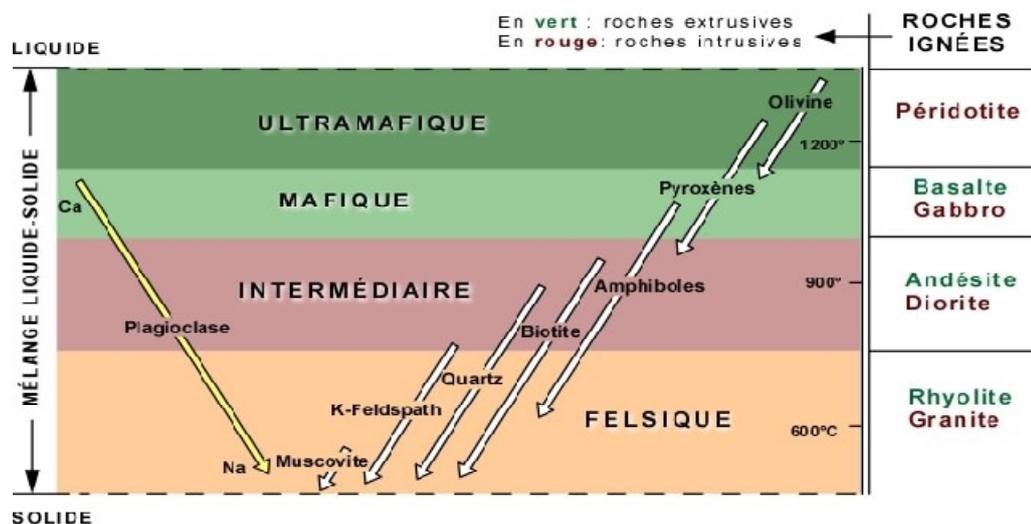


Figure II.15 La suite de Bowen et les quatre types de roches ignées correspondantes [15]

Selon le principe de Bowen, les premiers cristaux à se former sont ceux de haute température, olivine d'abord, pyroxènes et amphiboles ensuite, ces cristaux vont s'agglomérer et se déposer au fond de la chambre pour former une roche riche en olivine, pyroxène et amphibole. On parle de roche ignée mafique ou ultramafique selon les proportions des cristaux présents. Un gabbro ou une péridotite (Fig. II.9. Le liquide restant se trouve alors appauvri en ces minéraux; c'est un magma de composition différente de sa composition initiale, appelée composition intermédiaire.

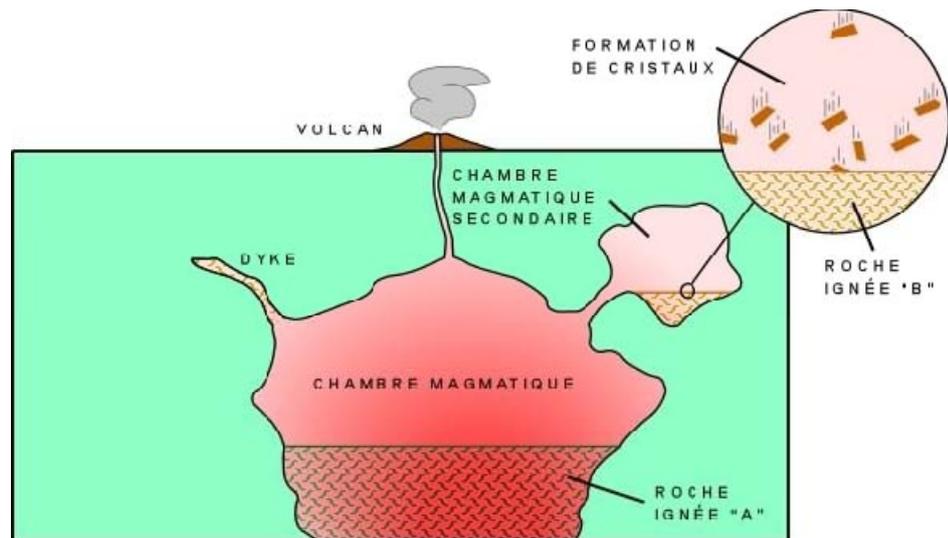


Figure II.16 Refroidissement du magma dans une chambre magmatique [15]

II 4.1.2 Classification et nomination des roches ignées

Le mode de mise en place conditionne en grande partie la structure et la texture des roches ignées. C'est pourquoi il est très important de le connaître. Sous l'effet de la pression des terrains et de sa densité (toujours inférieure à celle de son environnement) le magma remonte vers la surface. Deux situations sont donc à envisager:

II 4.1.2.1 Les roches ignées extrusives

Le magma (1200°C) arrive à la surface (20°C) de la lithosphère : son refroidissement est donc très rapide : les cristaux n'ont pas le temps de se former et se développer. Ils sont alors microscopiques ou même inexistantes. La roche a un aspect vitreux.

On parle alors de magma Volcanique: Les roches qui proviennent de ce processus sont dites: Roches Magmatiques Effusives ou Roches Volcaniques. Elles sont appelées aussi Roches Extrusives.

Elles ont refroidi à l'air libre ou sous l'eau ; sous forme de coulées de laves. Exemple de roches volcaniques: basalte, rhyolite, andésite... Elles sont pauvres en silice et de couleur plutôt sombre.

II 4.1.2.2 Les roches ignées intrusives (PLUTONIQUES)

Se refroidissent très lentement avant d'atteindre la surface. On les retrouve sous la forme de grandes masses appelées les batholites ou de minces filons comme les dykes et les sills. Ces filons sont formés lorsque le magma remonte à la surface. Les intrusions de roches ignées peuvent être concordantes ou discordantes. Les premières remplissent des fissures ou des cassures déjà existantes dans les roches, contrairement aux discordantes qui sont si puissantes qu'elles provoquent de nouvelles cassures. En résumé une classification simplifiée des roches ignées est donnée dans le Tableau II.4.

Tableau II.4 Type de roches ignées [15]

Type de roches ignées (ou magmatiques)	Intrusives	Extrusives
Autres noms donnés	Plutoniques	Effusives Volcaniques
Vitesse de refroidissement	Lent	Rapide
Endroit du refroidissement	À l'intérieur de la Terre	À la surface de la Terre
Grosseur des cristaux formés	Gros	Petits
Autres informations	Concordantes: s'incruster dans les cassures déjà présentes Discordantes: provoquent de nouvelles cassures	

II.4.2 Les roches sédimentaires

D'un point de vue général, les roches sédimentaires sont formées suite à un processus complexe d'altération et d'érosion des autres types de roches de la croûte terrestre.

Ce processus complexe est composé de quatre phases principales (Fig. II.17)

- Production de particules: par érosion et altération superficielle des roches de la croûte,
- Transport de ces particules: principalement par l'eau, le vent ou la glace
- Sédimentation et dépôt: dans un milieu favorable pour former un sédiment
- Diagenèse: processus physico chimique (compactage, cimentation chimique, biochimique...) qui transforme les sédiments pulvérulents en roche sédimentaire.

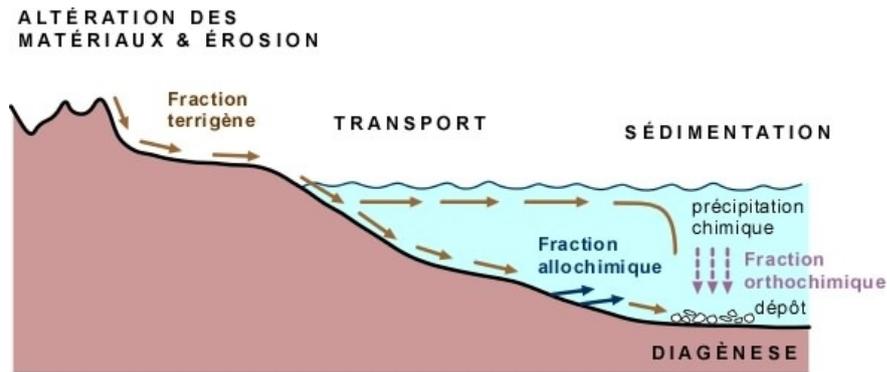


Figure II.17 Les principales phases de formation des roches sédimentaires

II 4.2.1 La diagenèse

Elle englobe tous les processus chimiques et mécaniques qui affectent des sédiments après leur dépôt pour former des roches sédimentaires.

Elle commence sur le fond marin, dans le cas d'un sédiment marin, et se poursuit tout au long de son enfouissement progressif sous le poids d'autres sédiments qui viennent le recouvrir.

Les dépôts sédimentaires peuvent atteindre des dizaines, des centaines ou même des milliers de mètres de matériel. Les processus de diagenèse sont variés et complexes : ils vont de la simple compaction du sédiment (sous l'effet de la surcharge) à sa cimentation (par l'apport d'un liant naturel), en passant par des phases de dissolution, de recristallisation ou de remplacement de certains minéraux. [8]

Le processus diagénétique qui est principalement responsable du passage du sédiment à la roche est la cimentation (Fig. II.18).

- Cimentation: c'est un processus relativement simple. L'eau qui circule dans les vides d'un sédiment, par exemple un sable, se trouve sursaturée par rapport à certains minéraux (carbonates). Elle précipite ces minéraux qui se déposent sur les grains de sable et finissent par les souder ensemble; on obtient alors une roche sédimentaire qu'on appelle dans ce cas un grès (sable à ciment calcaire). En fonction de la quantité de minéraux déposés le degré de cimentation peut être faible, on a alors une roche friable. Il peut être très poussé, et on a une roche très solide.

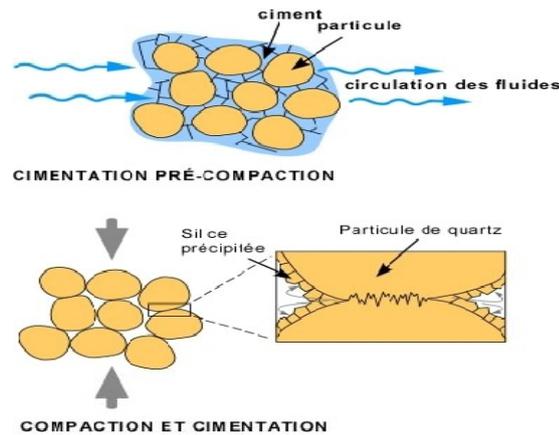


Figure II.18 Processus de diagenèse: cimentation et compaction [15]

II 4.2.2 Classement et dénomination des roches sédimentaires.

Il est possible de classer les roches sédimentaires en trois grandes classes génétiques:

II 4.2.2.1 Les terrigènes ou roches détritiques

- "terrigenes" car il s'agit de matériel issu des continents (terre).
- Elles forment près de 85% de l'ensemble des roches sédimentaires.
- Elles sont formées de particules minérales issues de l'altération des roches préexistantes.
- Elles sont généralement classées en fonction de la granulométrie de leurs constituants (conglomérats, grès, siltites, argilite) [6].

II 4.2.2.2 les roches biogéniques, biochimiques ou organiques

- Forment près de 15% des roches sédimentaires.
- Sont le produit, comme leur nom l'indique, d'une activité organique ou biochimique. L'altération fournit, outre les particules solides entrant dans la constitution des roches terrigènes, des substances dissoutes qui aboutissent dans les mers, les lacs et les rivières où elles sont extraites et précipitées par des organismes.
- Dans certains cas, les organismes utilisent les carbonates, phosphates, silicates pour constituer leur coquille ou leurs os et ce sont leurs restes qui constituent les roches sédimentaires.
- Les plantes accumulent des matériaux carbonés par photosynthèse et sont directement à l'origine du charbon.
- D'autres types de sédiments carbonés comme les schistes bitumineux, le pétrole... sont générés par des bactéries.

II 4.2.2.3 Les roches d'origines chimiques

- d'importance relativement faible (de l'ordre du 1%).
- résultent de la précipitation (purement physico-chimique) de minéraux dans un milieu sursaturé.
- Les évaporites (anhydrite, sel, gypse, sylvite,...) en sont le meilleur exemple: elles se forment par évaporation de saumures (eau très riche en sels);

II 4.2.3 Dénomination des roches sédimentaires

La dénomination des sédiments et roches sédimentaires se fait selon deux critères principaux :

- Taille des particules (granulométrie),
- Composition minéralogique.

La taille des particules (la granulométrie) chez les terrigènes et les allochimiques sert de critère de classement. Deux tailles sont importantes à retenir : 0,062 et 2 mm (Tableau II.5).

Tableau II.5 Dénomination des roches sédimentaires [15]

Les Terrigènes	
Sédiment	Roche
2 mm	Gravier CONGLOMÉRAT
0,062 mm	Sable GRÈS grès à quartz = orthoquartzite grès à feldspath = arkose
	Boue MUDSTONE (Shale)

Les Allochimiques (calcaires)	
Sédiment	Roche
2 mm	Gravier CALCIRUDITE
0,062 mm	Sable CALCARÉNITE
	Boue CALCILUTITE

Les Orthochimiques	
DOLOMIE: CaMg (CO ₃) ₂	
SEL: NaCl	
GYPSE: CaSO ₄ . H ₂ O	
CHERT: SiO ₂	

Tableau II.6 Exemple de classification des roches sédimentaires selon la taille des grains [32]

Classe	Taille des particules	Roches meubles	Roches consolidées détritiques
Rudite	> 2mm	Galets Graviers cailloux	Conglomérat 
Arénite	63µm < diamètre < 2mm	Sables	Grès 
Lutite	< 63µm	Silts Argiles	 Argilite  Siltite

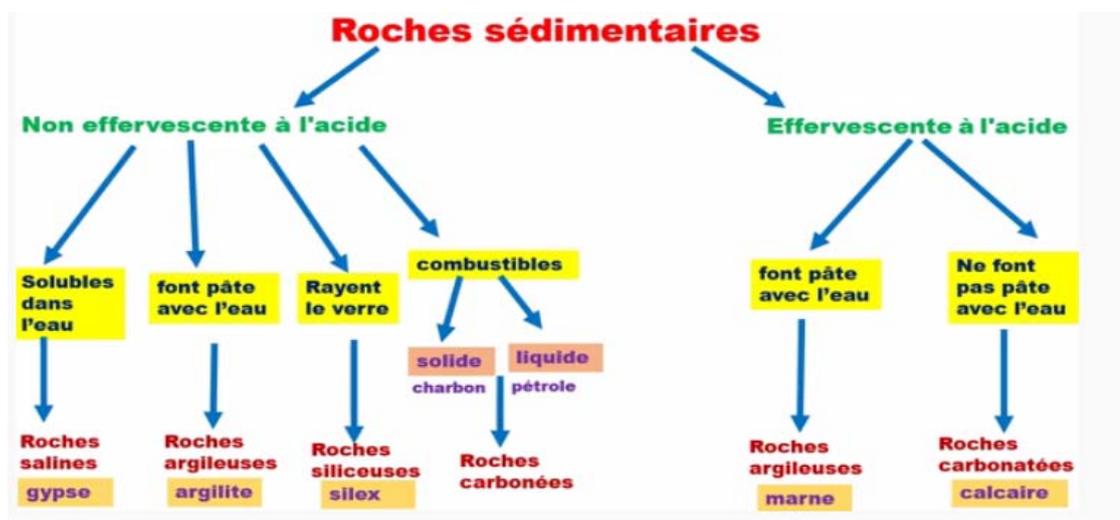


Figure II.19 Détermination simplifiée des roches sédimentaires

II 4.3 Les roches métamorphiques

Les roches métamorphiques sont le résultat de la transformation de roches (ignées ou sédimentaires) sous l'effet de température T et/ou de pressions P élevées. Deux grands types de métamorphismes existent [8]:

- a) Le métamorphisme de contact
- b) Le métamorphisme régional

II 4.3.1 Le métamorphisme de contact

Lorsque le magma, avec une température de plus de 1200°C, entre en contact avec les roches de la lithosphère (froides), ces dernières subissent un transfert de chaleur et une cuisson intense

(Fig. II.20). Cette cuisson est si forte qu'elle change leurs caractéristiques chimiques et minéralogiques. Dans ce cas on parle d'un métamorphisme de contact car il y a contact direct entre le magma intrusif et les roches encaissantes (métamorphosées).

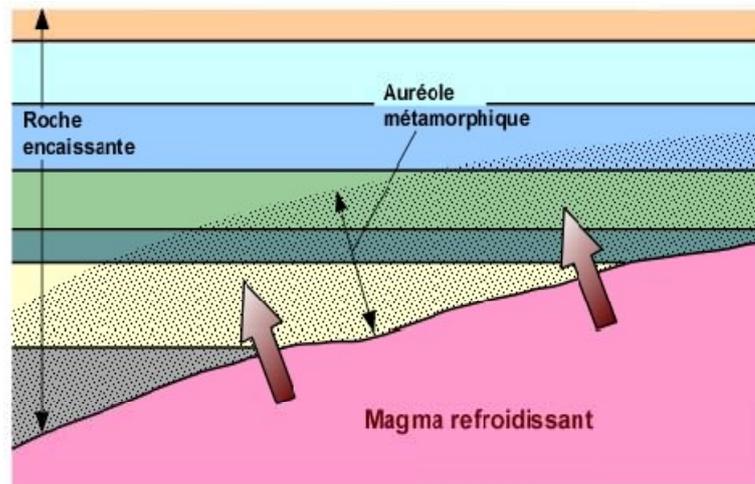


Figure II.20 Métamorphisme de contact [15]

II 4.3.2 Le métamorphisme régional et la foliation métamorphique.

Comme son nom l'indique, le métamorphisme régional affecte de très grandes régions. Dans ce cas il y a le concours en même temps de la température et de la pression des terrains sus-jacents. C'est pourquoi on rencontre souvent le métamorphisme régional dans les racines de chaînes de montagnes. Dans les zones de subduction entre une croûte océanique et une croûte continentale ou entre deux croûtes continentales [8].

Le métamorphisme régional produit trois grandes transformations:

- Une déformation souvent très poussée de la roche, sous l'effet de la grande P et T.
- Le développement de minéraux dits métamorphiques
- Le développement de la foliation métamorphique : les cristaux ou les particules d'une roche ignée ou sédimentaire seront aplatis, étirés (sous l'effet de P et T élevées) et donneront un aspect de minéraux linéaires alignés dans des plans de foliations (Fig. II.21).

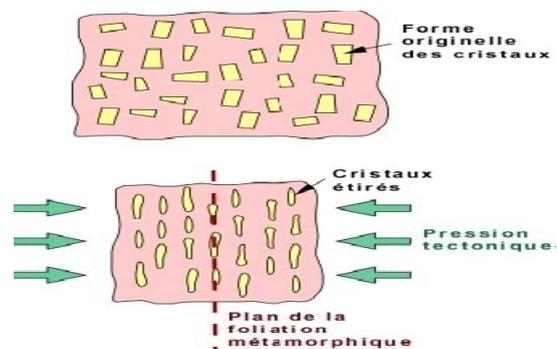


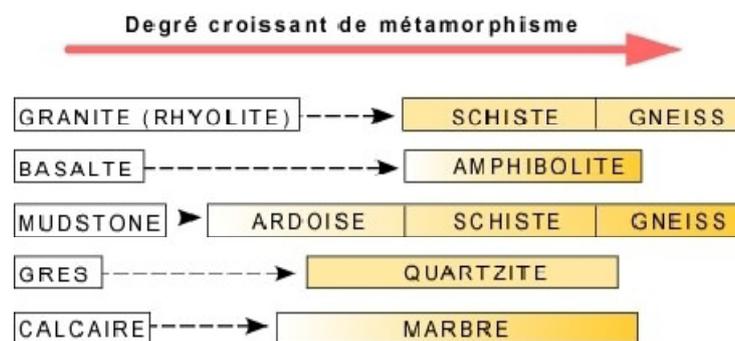
Figure II.21 Schématisation d'une foliation métamorphique

En terme quantitatif, les roches métamorphiques de type régional sont beaucoup plus importantes que celles de type de contact.

II 4.3.3 Dénomination des roches métamorphiques

Suite au métamorphisme que subissent les roches, il se développe des minéraux spécifiques à chaque degré de métamorphisme. Ces minéraux sont donc utilisés comme indicateurs du degré de métamorphisme subit par la roche étudiée [13].

Ces minéraux peuvent nous renseigner par exemple sur les conditions de T et P qu'il y avait lors de la formation de la roche. Et de là, déduire la profondeur à laquelle elle se trouvait. De la même manière que pour les roches ignées et sédimentaires, on a donné une dénomination aux roches métamorphiques. La Figure II.22 qui suit présente les roches d'origine (à gauche) et le résultat de leur métamorphisme (à droite) ainsi que le degré de celui-ci (flèches en tirait).



Longueur de la flèche = degré de métamorphisme)

Figure II.22 Dénomination des roches métamorphiques (à gauche: roche d'origine; à droite: roche métamorphique résultantes. [13]

Tableau II.7 Classification des roches métamorphique basée sur des séquences métamorphiques. [33]

Roches originelles		Minéraux index	Métamorphisme	
Sédimentaires	Magmatiques		De contact	Régional
Argile		Min. argileux Micas Silicates d'alumine Cordiérite - Grenats	Schiste, Cornéenne	Micaschiste Gneiss Granulite
Grès Grauwacke	Granite Rhyolite	Phyllites Grenats Quartz - Feldspaths	Quartzite	Quartzite Gneiss
Calcaire Dolomie		Calcite - Dolomite Epidote - Grenats Ca Diopside - Feldspaths Ca	Marbre Cipolin	Calcschiste Marbre Cipolin
Marne Grauwacke	Basalte - Gabbro Andésite - Diorite	Epidote - Amphiboles Pyroxènes - Olivine	Cornéenne	Schiste Amphibolite Pyroxénite Eclogite

II 5 L'intérêt des roches et leurs utilités

Compte tenu des usages très divers qui ont été donnés aux roches, elles s'avèrent aujourd'hui d'une importance essentielle dans la vie quotidienne de l'être humain, car elles ont des teneurs minérales qui ont trouvé diverses applications industrielles qui ont amélioré la qualité de vie des personnes.

II 5.1 Utilité des roches à l'état naturelle

L'utilisation des roches n'est pas seulement limitée aux minéraux qu'ils contiennent, mais ils ont aussi de multiples usages à l'état de roche naturelle, sans autre transformation plus difficile qu'une coupe, comme quand on les utilise pour enduire. Nous allons énumérer plusieurs aspects importants liés aux roches, à leur étude et à leurs utilisations [31].

L'un d'eux, par exemple, est que les roches sédimentaires sont considérées comme des roches mères et un réservoir d'hydrocarbures, comme le pétrole et le gaz), ce sont deux ressources naturelles non renouvelables qui sont utilisées quotidiennement.

Un autre aspect important à garder à l'esprit est que ce type de tocas peut également être un dépôt de grandes quantités d'eau souterraine de qualité, c'est pourquoi, dans certaines villes où il n'y a pas de rivières à proximité, elles ont de l'eau.

Si nous nous référons aux matériaux avec lesquels les composants sont fabriqués et mélangés pour construire nos maisons, ils proviennent normalement du fer avec lequel les poutres des colonnes sont fabriquées jusqu'aux composants électroniques avec lesquels sont fabriqués les téléviseurs. qui les rendait aptes aux applications pour lesquelles l'homme en avait besoin.

C'est la raison principale pour laquelle il existe aujourd'hui de nombreuses entreprises multinationales qui se consacrent à l'exploitation minière métallique et non métallique, dans le but d'obtenir et d'extraire les éléments qui seront utilisés pour construire et fabriquer les biens que nous allons acquérir pour notre maisons [31].

Un autre exemple de ceci est qu'il existe des roches qui sont liées au cuivre, et jusqu'à présent, le matériau le plus utilisé pour l'électricité à acheminer vers nos maisons est le cuivre..

II 5.2 Utilité des roches dans le domaine de Génie civil

Au sein du groupe de roches se trouvent celles qui sont utilisées dans l'industrie de la construction et du génie civil. À son tour, cette classe de roches peut également être subdivisée en deux classes principales :

- Roches utilisées comme matériau de construction.
- Roches ou pierres ornementales.

Dans le cas des roches utilisées comme matériaux de construction, elles peuvent également être appelées matériaux de pierre ou d'agrégats, et ce sont ceux qui peuvent être extraits des carrières de pierre que l'on trouve à proximité des villes.

Ils sont principalement utilisés dans la fabrication du béton, pour poser les fondations pour la construction de maisons, d'immeubles, de ponts ou comme lit de remplissage pour la construction de dalles pour les routes, les voies ferrées et de nombreuses autres utilisations.

Il en existe d'autres qui entrent dans la fabrication du ciment comme le calcaire et le marbre et qui peuvent être complétés par du gravier, du sable, de l'andésite, du basalte, de la pierre ponce ou de la diorite [31].

En ce qui concerne les roches ou pierres ornementales, ce sont celles qui sont utilisées pour une utilisation dans les finitions ou dans les revêtements de construction. Dans ce cas particulier, la diorite, le gabbro, le granit se distinguent et, en général, tout autre type de roche qui se distingue par sa couleur ou sa beauté, de sorte qu'il peut être utilisé comme revêtement ou comme ornement.

II 6 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 éléments sur les roches

III.1 Introduction

Le modelé des paysages évolue au cours du temps sous l'action de différents agents d'érosion. Les continents s'aplanissent et tendent vers un niveau de base, celui des océans. Les paysages obtenus reflètent la nature, la composition et l'architecture des formations géologiques. L'eau, la glace, le vent, sculptent les surfaces continentales.

III.2. Action des différents éléments sur les roches

III.2.1 Action de l'air (du vent) sur les roches

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 [19] (Fig. III.1)

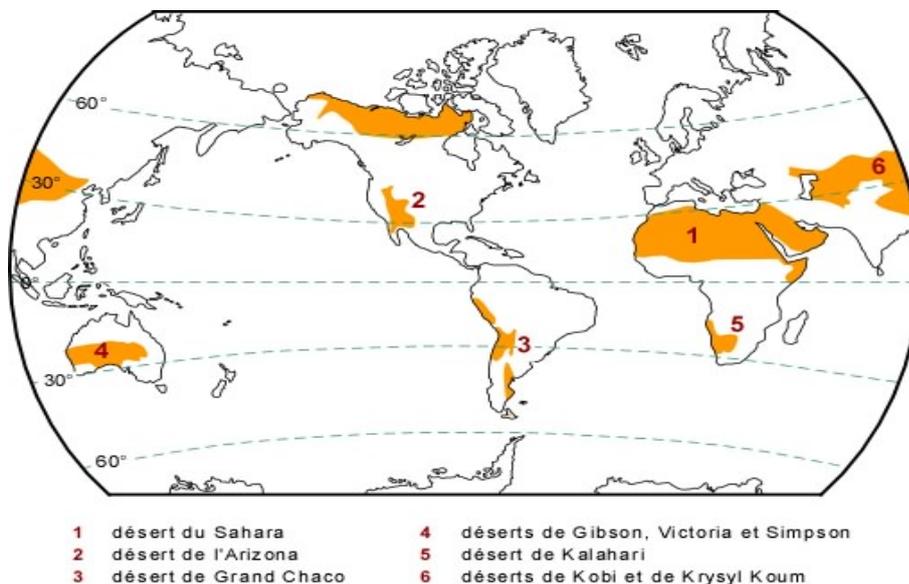


Figure III.1 Les grands déserts du monde [19]

Ces régions sont constamment sous des conditions de haute pression atmosphérique où descend l'air sec, ce qui est aussi vrai pour les régions polaires qui sont aussi considérées comme désertiques compte tenu qu'elles reçoivent moins de 20 cm/an de précipitations (en équivalent pluie).

III.2.1.1 La répartition des déserts

La répartition des déserts est déterminée par la circulation atmosphérique qui dépend de la radiation solaire.

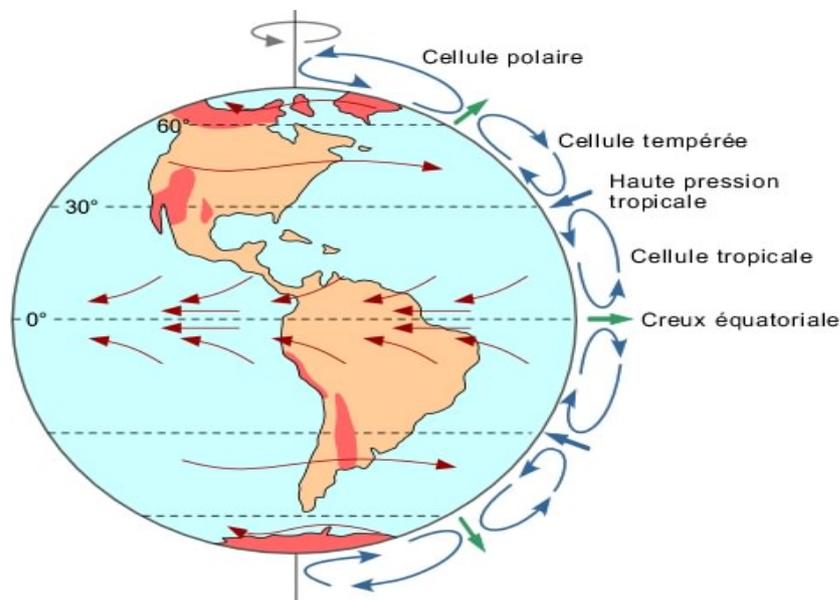


Figure III.2 La circulation atmosphérique [19]

L'air chauffé dans les régions équatoriales a tendance à monter. Il se crée donc à l'équateur, un flux d'air ascendant qui détermine une zone de basse pression: le creux équatorial. Arrivé dans la haute atmosphère plus froide, cet air ascendant très humide condense et forme les nuages et pluies de la zone équatoriale. L'air se débarrasse donc de son humidité; il s'assèche.

Il redescend au niveau de latitude 30°, sous forme d'un air très sec, pour former une zone de haute pression. Ce couple ascension-descente forme une cellule de circulation atmosphérique, la cellule tropicale. Ceci engendre une autre cellule atmosphérique, la cellule tempérée qui crée, autour des latitudes 60°, des courants ascendants (Fig. III.2).

Plus vers les pôles, les cellules polaires vont ramener dans les cercles polaires de l'air sec. Il en résulte que les régions qui se situent à la hauteur des latitudes 30° et 90°, dans les deux hémisphères, sont balayées par de l'air sec.

C'est pourquoi on y retrouve les grandes zones désertiques, non pas à l'équateur, comme on pourrait le penser puisqu'il y fait le plus chaud, mais autour des latitudes 30°.

Il peut sembler paradoxal de qualifier les cercles polaires de déserts, mais effectivement, même s'il y fait froid, ce sont des déserts où les précipitations sont minimales. Dans les déserts, l'agent principal d'érosion et de transport des matériaux est le vent.

III.2.1.2 Les modes de transport des particules

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 (Fig. III.3).

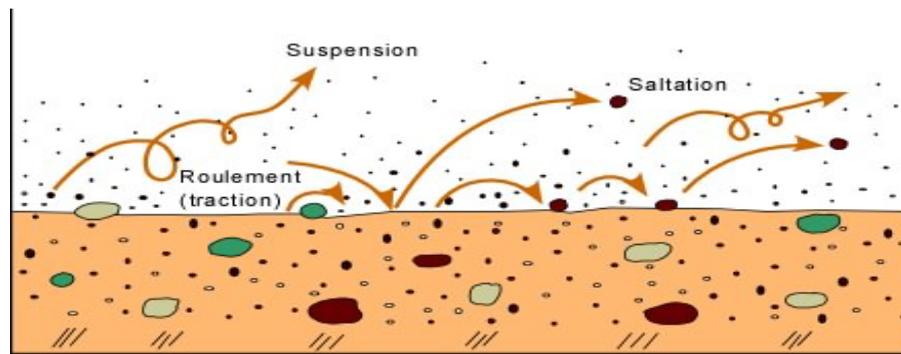


Figure III.3 Les modes de transport des particules [19]

- *Roulement* : 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.
- *Saltation* : Les particules de taille moyenne (sables) se déplacent par bonds successifs
- *Suspension* : Les particules très fines (poussières) sont transportées en suspension dans l'air (loess), souvent sur de très grandes distances.

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

III.2.1.3 Structures des déserts

III.2.1.3.1 Les pavements de désert

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 (Fig. III.4).

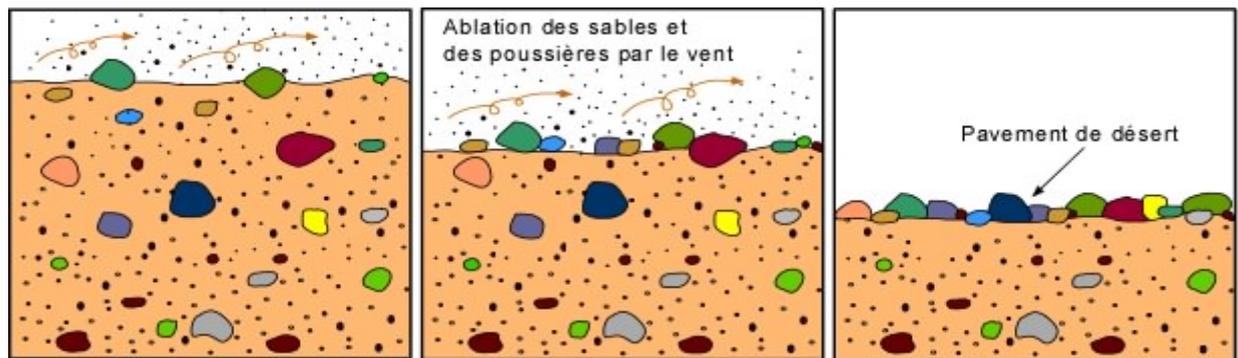


Figure III.4 La formation des pavements de désert [19]

III.2.1.3.2 Les champs de dunes

Les sables transportés par le vent s'accumulent sous forme de dunes.

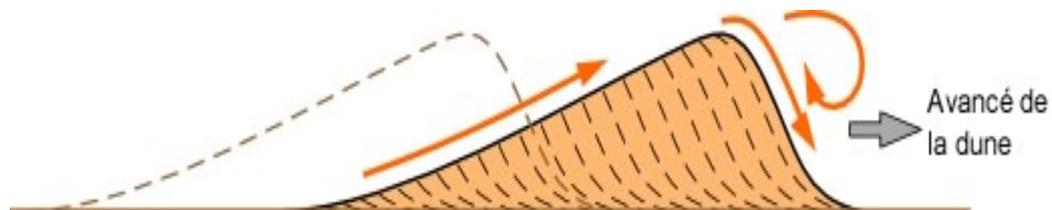


Figure III.5 Les champs de dunes [19]

Ces dernières se déplacent, sous l'action du vent, par saltation des particules sur le dos de la dune; elles viennent se 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 (Fig. III.5). C'est ce qui cause la structure interne en laminaire parallèles inclinées qui indiquent le sens du déplacement de la dune.

III.2.2 Action de l'eau sur les roches et ses constituants

L'eau issue des précipitations et de la fonte des glaciers circule dans notre environnement. Elle ruisselle et peut s'infiltrer dans le sol et le sous-sol.

III.2.2.1 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. 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.

➤ Action de l'eau sur les roches granitiques

- Un affleurement de granite montre des boules dures de granite sain entourées d'un sable grossier. Le sable, appelé arène granitique, provient de la désagrégation progressive et très lente du granite sain.
- Transformation du granite sain en arène granitique : Un massif granitique présente de nombreuses fissures : les diaclases par lesquelles l'eau de pluie va s'infiltrer. L'eau provoque alors une transformation chimique des minéraux qui composent le granite. Les minéraux les plus fragiles comme les feldspaths et les micas vont s'altérer et se transformer en minéraux argileux responsables de la couleur rouille de l'arène granitique.

L'altération des minéraux du granite est ainsi responsable du passage d'une roche cohérente (le granite sain) à une roche friable, puis à une roche meuble (l'arène granitique) (Fig. III.6)

Tableau III.1 Caractéristiques du granite sain et de l'arène granitique

	Granite sain	Arène granitique
Cohérence	Cohérent	Meuble
Couleur	Gris ou rose	Rouille
• Quartz	Gris - non altérés	Gris - non altérés
• Feldspatz	Blancs - plus ou moins brillants - non altérés	Gris ; ternes ; ocre – altérés
• Micas	Noirs ou blancs - non altérés	Peu nombreux - très altérés
Minéraux argileux	Absence	Poudre argileuse de couleur rouille

- Les eaux de pluies vont entraîner par ruissellement les éléments meubles de l'arène (sables et argiles) et dégager ainsi les boules de granite sain. On observe alors des paysages caractéristiques appelés chaos granitiques (Fig. III.7).

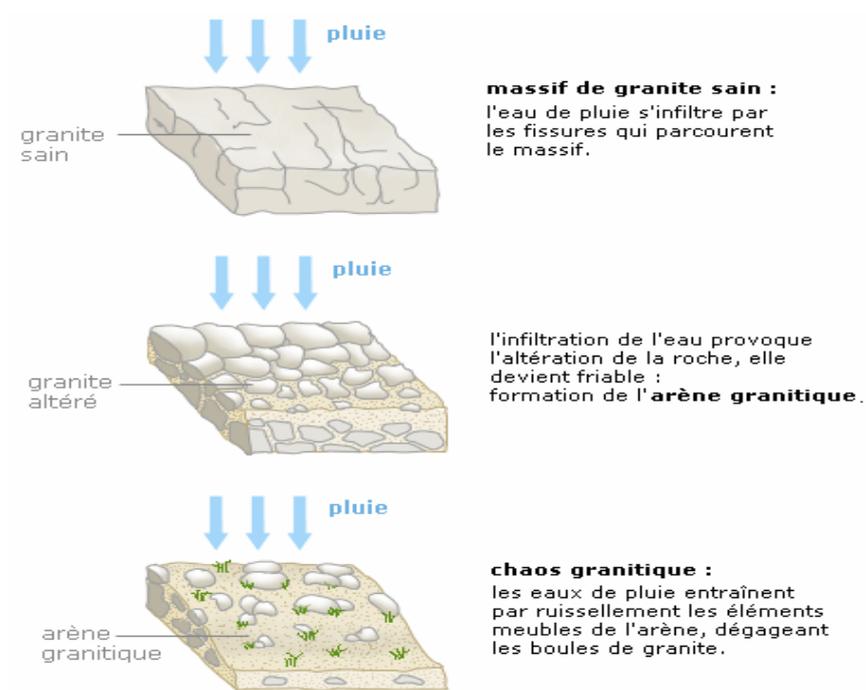


Figure III.6 Transformation du granite [14]



Figure III.7 Roches granitiques en Bretagne

III.2.2.2 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 [14].

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 :

a) La dissolution

La dissolution est d'autant plus forte que la solubilité des minéraux est élevée, les plus vulnérables étant les minéraux des roches salines (sel gemme, potasse, gypse) (Fig. III.8).



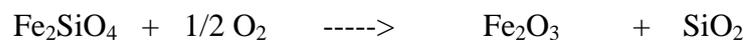
Figure .III.8 Les reliefs particuliers "d'entonnoirs" [23]

Le gypse ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) est une roche exogène, une évaporite, relativement soluble dans l'eau. Dans les zones montagneuses, sa dissolution crée des reliefs particuliers sous forme "d'entonnoirs" (Fig.III.8). L'eau, la neige s'accablent dans de petites dépressions où la dissolution s'opère, donnant des paysages caractéristiques.

b) Les oxydations / réductions

Les oxydations concernent surtout le fer qui passe de l'état ferreux à l'état ferrique.

Exemple pour un minéral d'olivine : olivine + oxygène ----> oxyde ferrique + silice.



Les réductions sont plus rares : elles se déroulent dans les milieux hydro morphes (saturés d'eau de façon permanente ou périodique) et produisent en particulier du fer ferrique au fer ferreux soluble.

c) La décarbonatation

Elle produit la solubilisation des calcaires et des dolomies 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 [23].

Les dolines sont des reliefs de surface du modelé karstique (Fig. III.9). Ce sont des dépressions circulaires dont le fond est occupé par de la *terra rossa*, résidu argileux rouge de la dissolution des calcaires.



Figure .III.9 Surface du modelé karstique « Les dolines » [23]

d) L'hydrolyse

Elle est définie comme étant la destruction d'un édifice moléculaire complexe en édifices moléculaires plus simples sous l'influence de l'eau. Les hydrolyses constituent les principales réactions d'altération.

Elles peuvent être totales lorsque le minéral est détruit en plus petits composés possibles (hydroxydes, ions) ou partielles lorsque la dégradation est incomplète et donne directement des composés argileux.

Le bilan général d'une réaction d'hydrolyse peut s'écrire :

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

➤ Action de l'eau sur les roches calcaires

Les massifs calcaires présentent de nombreuses et larges fissures par lesquelles s'infiltrer l'eau. En traversant l'atmosphère et le sol, l'eau de pluie s'enrichit en dioxyde de carbone. Elle devient ainsi capable de dissoudre le calcaire (Fig. III.10).

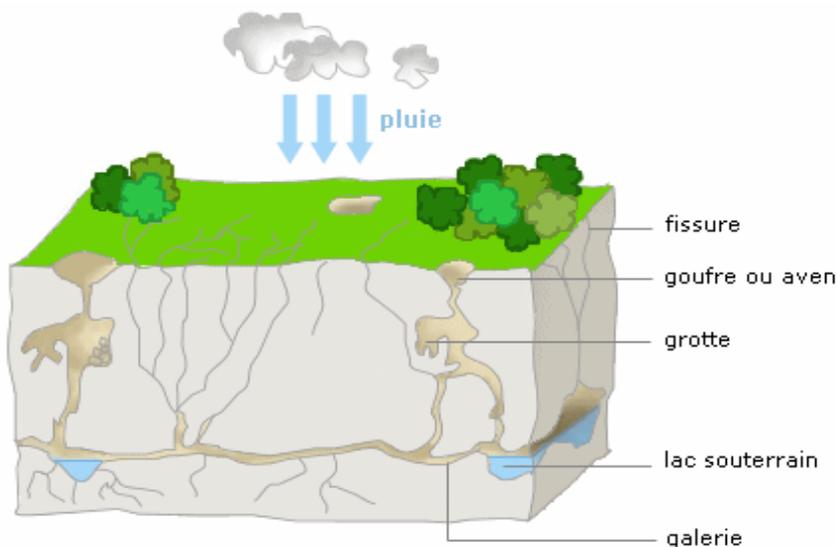


Figure .III.10 Transformation du massif calcaire due à l'infiltration d'eau [24]

III.2.3 Action des glaciers sur les roches

Lorsque les températures moyennes d'une région se situent sous 0°C , les précipitations se font le plus souvent sous forme de neige et, surtout, les fontes ne sont pas suffisantes pour empêcher qu'il n'y ait accumulation de neige et de glace. On reconnaît deux grandes zones d'accumulation des glaces : les régions polaires et les régions en hautes altitudes. On aura conséquemment deux grands groupes de glaciers : les calottes polaires, et les glaciers alpins (ou de montagnes), en hautes altitudes [24].

III.2.3.1 Les paysages glaciaires

Les glaciers occupent une superficie de 15 millions de kilomètres carrés, dont 97 % dans l'Antarctique et au Groenland.

Les glaciers résultent de l'accumulation de neige d'une année sur l'autre. La neige persiste au-dessus d'une limite qui est fonction de l'altitude et de la latitude. Au-dessus de cette limite, cependant, certains pics sont trop raides pour que la neige y subsiste : ce sont les nunataks. Par contre, d'un glacier peut s'échapper une langue glaciaire qui débordera la limite des neiges à une altitude souvent très inférieure. L'extension des glaciers est fonction des conditions d'alimentation et de fusion [24].

III.2.3.1.1 Les calottes polaires

On estime que les glaces couvrent aujourd'hui à peu près 10% des masses continentales.

a) La calotte polaire de l'Antarctique est la plus grande et la plus épaisse. Elle couvre pratiquement tout le continent antarctique (Fig. III.11).

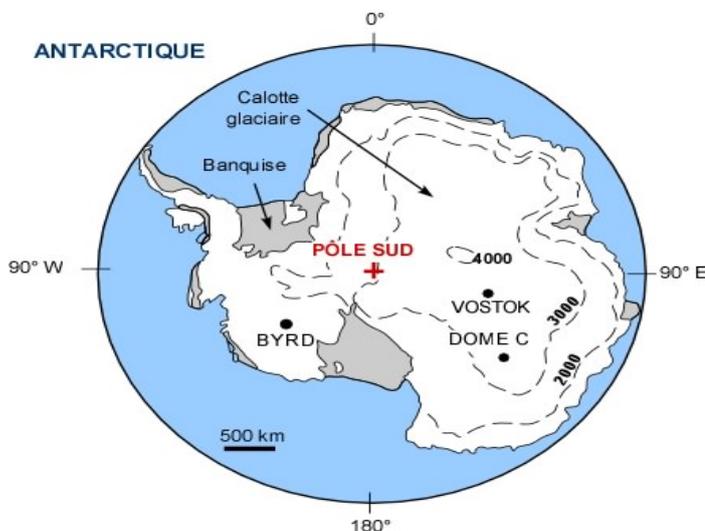


Figure III.11 La calotte polaire de l'Antarctique [24]

A son centre, la glace atteint une épaisseur de 4 000 m. C'est une énorme quantité de glace. Les forages faits à travers ces glaces par les soviétiques en 1988 ont montré que les premiers 2 000 m avaient mis 150 000 ans à s'accumuler, soit un taux annuel moyen d'accumulation de glace de 1,3 cm. Plus récemment, en 1998, un forage a atteint 3623 m de profondeur, représentant 400 000 ans d'accumulation pour un taux annuel moyen de 0,9 cm.

b) *Groenland* : La deuxième calotte polaire, elle est un peu plus mince, 3 000 m au centre (Fig. III.12). Des forages complétés en 1992 par un consortium de 8 pays européens ont montré qu'il a fallu 250 000 ans pour accumuler ces 3 000 m, soit un taux moyen semblable à celui de l'Antarctique de 1,2 cm/an.

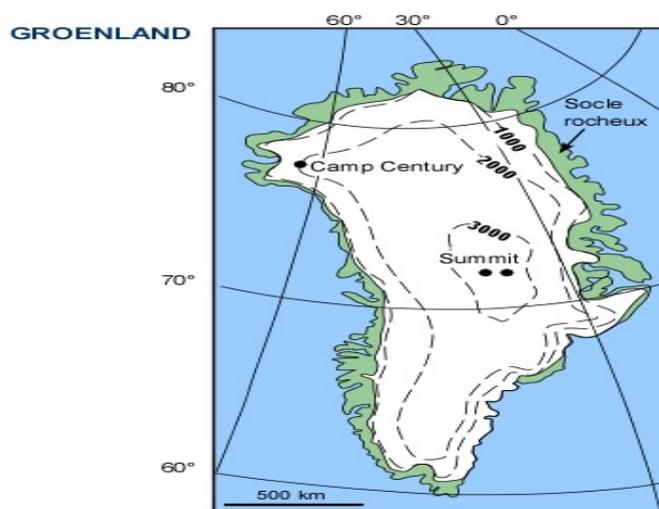


Figure III.12 La Groenland [24]

Cette masse de glace crée une surcharge énorme sur la croûte continentale. Compte tenu de la densité de la glace qui est de l'ordre de 2,7 fois moindre que celle des roches de la croûte terrestre continentale, on peut simplifier en disant qu'ajouter 2 700 m de glace, c'est comme ajouter une épaisseur de 1 000 m de roches à la croûte continentale.

Comme la lithosphère continentale "flotte" sur l'asthénosphère, cette surcharge, qui se fait dans un laps de temps géologique très court, a pour effet d'enfoncer le continent.

III.2.3.1.2 Les glaciers alpins

On réfère à la glaciation qui se confine aux hautes montagnes comme à la glaciation alpine, différente de la calotte polaire; alpine, parce que c'est dans les Alpes que ce type de glaciation a d'abord été décrit [4].

En hautes montagnes, on aura deux types de glaciers: la calotte alpine formant une grande superficie de glace couvrant les sommets, à partir de laquelle s'écoulent des glaciers alpins confinés aux vallées (on dit aussi glaciers de montagnes, glaciers de vallées).

Dans les secteurs montagneux qui se situent au-dessus de la limite des neiges persistantes, c'est-à-dire sous 0°C en moyenne, l'eau s'accumule sous forme de neige qui se compacte en glace. Mais la glace ne peut s'accumuler indéfiniment. Puisque les zones d'accumulation ne sont pas confinées, la glace s'écoule (Fig.III.13).

Il peut paraître difficile de concevoir que la glace s'écoule, mais, en faisant intervenir le facteur temps, la glace se comporte comme un matériau plastique, ou tout au moins semi-plastique [2]. Le poids du matériel à la zone d'accumulation initie et conduit l'écoulement de la glace en poussant sur toute la masse qui s'écoule. Cet écoulement est lent: 180 m/an pour les plus grands glaciers des Alpes, de 90 à 150 m/an pour les glaciers plus petits. Le schéma suivant illustre le système glaciaire alpin.

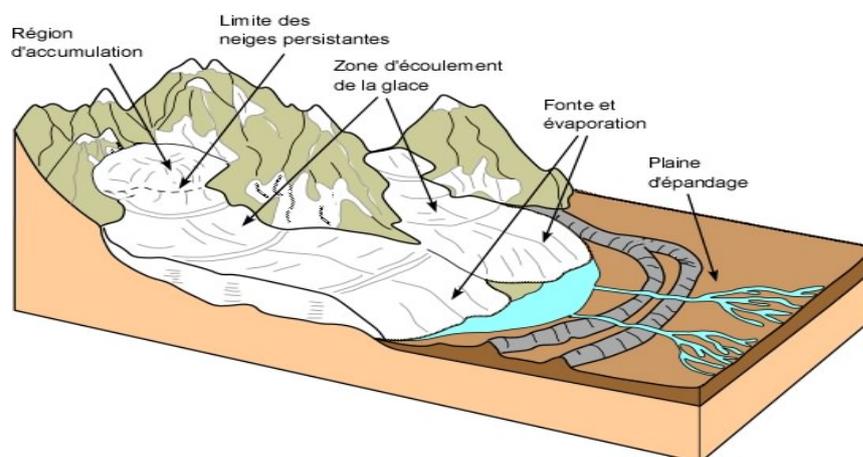


Figure III.13 Le système glaciaire alpin [24]

III.2.3.2 Le travail de la glace

Le glacier se répand sur une certaine distance. Rendu à une altitude où les températures moyennes sont au-dessus de 0°C, il y a fonte et évaporation au front du glacier [2]. Si les températures annuelles moyennes et le taux de précipitation demeurent assez constants sur une période de temps assez longue, soit plusieurs dizaines ou même centaines d'années, il s'établit un équilibre entre l'alimentation, la vitesse d'écoulement, et la fonte et évaporation au front, ce qui fait que le front du glacier demeure stationnaire.

Si au contraire, il y a augmentation ou diminution des températures moyennes, le front retraite ou avance. Sur le glacier et au front du glacier, la fonte de la glace produit des eaux de circulation qui distribuent les sédiments piégés dans le glacier et forment, à l'avant du glacier, une plaine d'épandage [24].

Les glaciers alpins sculptent la montagne d'une manière bien caractéristique, facilement reconnaissable. Les schémas qui suivent illustrent ce modelage. Les glaciers empruntent souvent un relief déjà modelé par les cours d'eau. Rappelons que les vallées creusées par les cours d'eau ont un profil en V (Fig.III.14a)

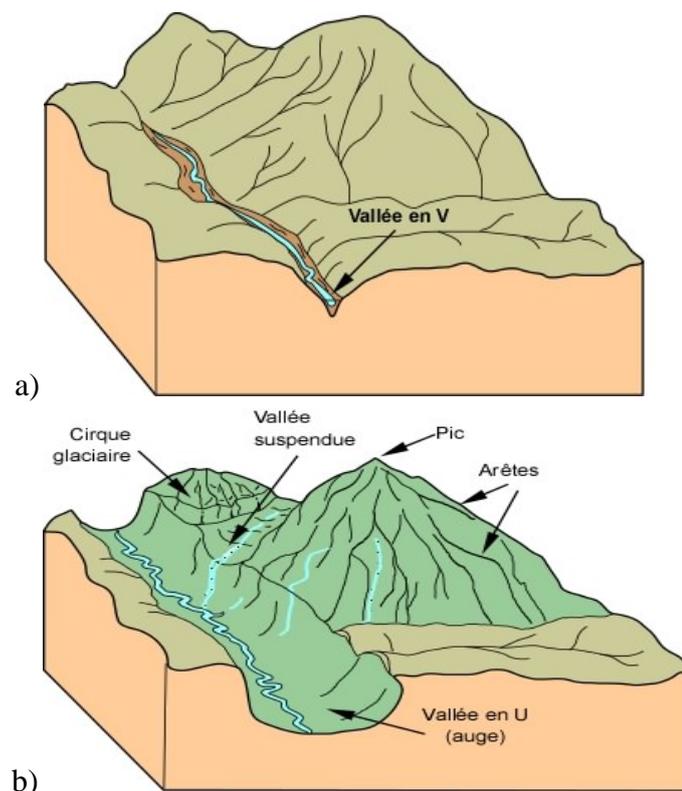


Figure III.14 Le modelage des vallées par les glaciers alpins [24]

Durant la glaciation, l'écoulement des glaces creuse à nouveau les vallées. C'est une masse importante qui agit sur la roche de fond comme un bulldozer. Le creusement n'est pas instantané,

mais se fait progressivement à mesure de l'écoulement sur de longues périodes de temps. Progressivement, vont se creuser des vallées qui peuvent atteindre des centaines de mètres de profondeur. Ces vallées auront un profil bien caractéristique en U (on dit aussi en auge).

Le glacier façonne le lit rocheux par les processus de raclage et de polissage.

Le *raclage* résulte du frottement exercé sur la roche en place par les blocs et les débris contenus dans la glace. Sur les parois, le raclage crée des cannelures larges de 5 à 50 cm et de deux à cinq fois moins profondes.

Sur les parois et sur le fond, les pierres emportées créent des stries profondes de quelques millimètres. Sur le fond, les pierres donnent naissance à des griffures, sillons étroits, qui fournissent des indications quant à la direction et au sens de l'écoulement de la glace.

Le *polissage* est l'œuvre d'une glace peu chargée en matériaux grossiers. S'il dure longtemps, il entraîne une usure en arrondissant les saillies et donne naissance aux *roches moutonnées*. La glace érode également par *quarrying*, c'est-à-dire par déchaussement de blocs (surtout dans le cas des roches diaclasées) [24].

La glace façonne les matériaux transportés : les matériaux de la moraine de fond sont plus triturés que ceux de la moraine de surface et contiennent par conséquent plus de limon. Les matériaux glaciaires sont peu aplatis et peu émoussés.

Après la fonte des glaces, on aura un paysage de cirques glaciaires (anciennes zones d'accumulation de la glace), de vallées dites en U (auges glaciaires) (Fig.III.14b), de pics et d'arêtes délimitant des vallées suspendues résultant du creusement par des glaciers plus petits venant se fondre dans le glacier principal.

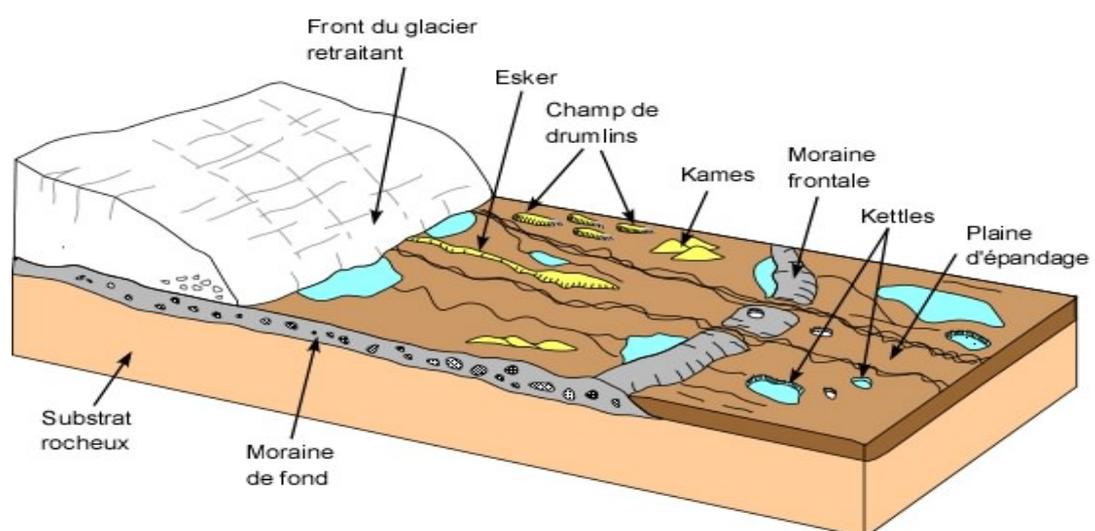


Figure III.15 Les principaux dépôts qui caractérisent le paysage postglaciaire [24]

La figure III.15 montre les principaux dépôts qui caractérisent le paysage postglaciaire :

Moraine frontale: dépôt formé au front du glacier, quand le glacier a atteint son avancé maximum et qu'il est stationnaire, par l'amoncellement des fragments rocheux de toutes tailles arrachés au substrat par le glacier, ainsi que des sédiments produits par l'abrasion de la glace sur la roche. Ce mélange de sédiments s'appelle **un till**.

Moraine de fond: dépôt morainique sous le glacier.

Moraine latérale: dépôt morainique aux marges du glacier confiné.

Drumlin: moraine de fond remodelée par l'avancé du glacier.

Esker: dépôt fluvio-glaciaire serpentiforme formé par des cours d'eau confinés qui se situaient à l'intérieur ou sur le glacier; la fonte du glacier laisse un lacet de sédiments.

Kame: dépôt fluvio-glaciaire dans une cavité ou une dépression du glacier qui, après la fonte forme de petits monticules.

Kettle: dépression dans une moraine ou un dépôt fluvio-glaciaire créée par la fonte d'un bloc de glace emprisonné dans les matériaux.

L'accumulation des glaces ne causent pas que des surcharges et des dépressions importantes à la croûte terrestre. L'alternance des périodes d'englaciations et de fontes causent des fluctuations du niveau des mers.

Le stockage des eaux terrestres dans les glaces polaires entraîne un abaissement du niveau marin, alors que la fonte des calottes polaires s'accompagne d'une remontée de ce niveau. Par exemple, on note des abaissements allant jusqu'à 130 m plus bas que le niveau actuel à certaines périodes. La courbe qui suit montre qu'il y a 20 000 ans, le niveau marin était plus bas de 100 m qu'aujourd'hui (Fig. III.16).

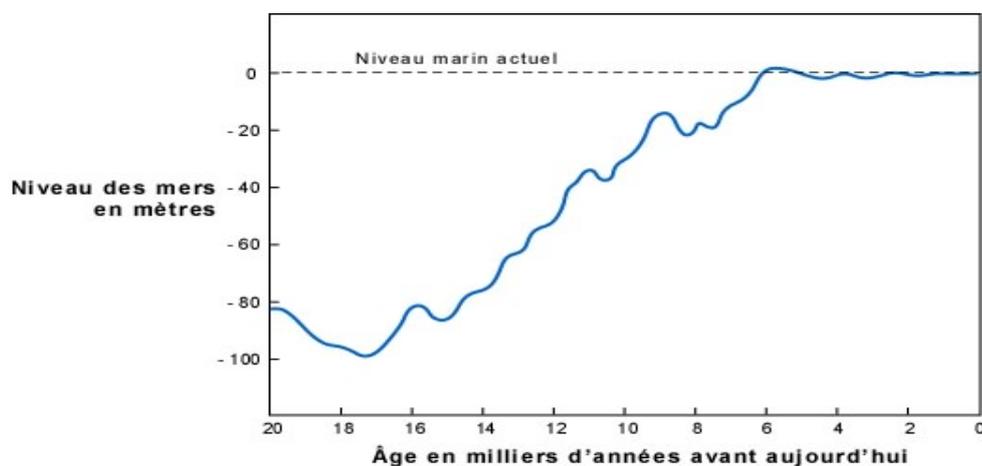


Figure III.16 Le niveau marin [24]

III.2.3.3 Les argiles de la Mer de Champlain: des argiles sensibles

Un des héritages que nous a légué le Grand Age Glaciaire dans les vallées est un risque naturel important: les glissements de terrain reliés aux argiles sensibles. En plusieurs endroits, ont laissé d'épais dépôts de boues pouvant atteindre les 50 mètres d'épaisseur. Ces boues sont en fait une farine de roche produite par l'érosion glaciaire, composée à 80-90% de quartz et de feldspath, et à 10-20% de phyllo silicates (des argiles au sens minéralogique du terme) [24].

Cette farine de roche a été déposée dans un milieu marin dans des eaux contenant 35 gr/l de sels. Ces sels agissaient comme liant dans le sédiment en développant des forces ioniques entre les particules de quartz et de feldspaths, ce qui contribuait à stabiliser le dépôt.

Avec le retrait de la mer, les dépôts ont été traversés par les eaux douces des pluies qui ont lessivé les sels, détruisant par le fait même une grande partie de la cohésion du sédiment. La présence d'agents dispersifs, comme les acides organiques provenant de l'humus des sols, ont contribué aussi à affaiblir la cohésion du dépôt.

Ces boues sont sensibles à la déstabilisation ("d'argiles sensibles", même si en fait il y a très peu d'argiles proprement dit), entre autres, par les séismes ou des activités anthropiques. Ce sont ces "argiles" qui ont été responsables des grands glissements de terrain qu'on a connus à Nicolet en 1955, à Yamaska en 1974 et à St-Jean-Vianny en 1971 où il y a eu 31 morts et des dégâts très importants.

III.3 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

IV.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 géomatériaux 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.

IV.2 La géodynamique interne

Concerne les mouvements et les processus qui affectent l'intérieur de la Terre [2]. Il s'agit essentiellement d'une thermodynamique reliée à la déperdition de chaleur causée par la désintégration radioactive de certains éléments. Une des manifestations les plus tangibles de cette dynamique est le déplacement de plaques rigides (lithosphériques) qui comprend la croûte (continentale et/ou océanique) avec la partie supérieure d manteau (Fig. Iv.1).

La lithosphère s'est brisée en douzaine de plaques rigides glissent sur du matériel plastique l'asthénosphère qui est partiellement fondue [4]. La limite entre la lithosphère et l'asthénosphère n'est pas le *Moho* mais plutôt une zone où les vitesses des ondes sont ralenties.

Cette zone est dénommée *Low velocity zone (LVZ)* (zone à faible vitesse sismique). Cette mécanique est décrite par la théorie de la tectonique des plaques, une théorie 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..

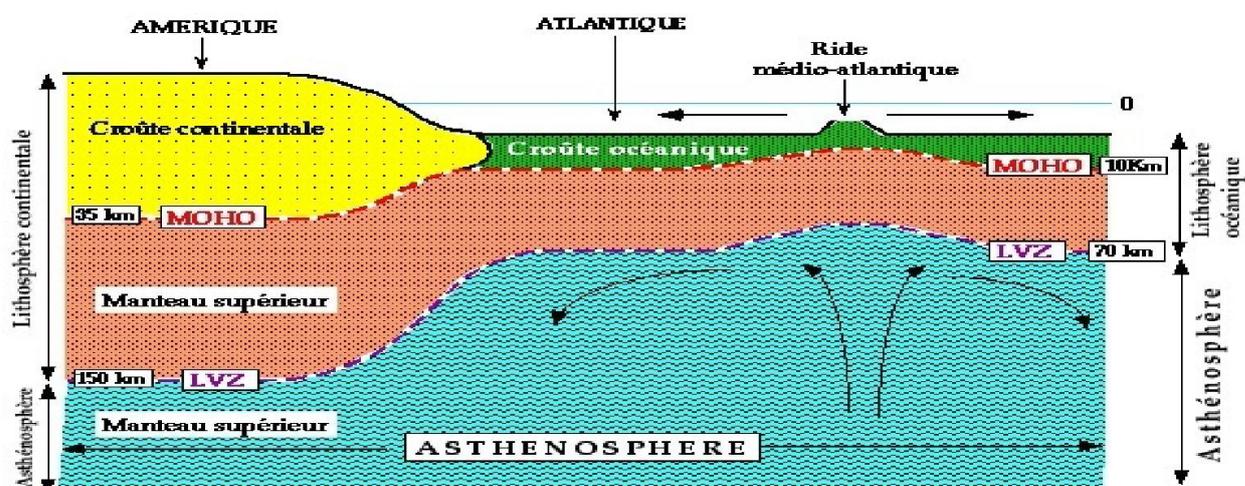


Figure IV.1 Les limites des plaques rigides [3]

IV.3 La tectonique des plaques

C'est Alfred Wegener qui, le premier, proposa la théorie de la dérive des continents. Les activités sismiques et volcaniques à la surface du globe sont localisées au niveau des jointures entre les douze plaques lithosphériques majeures. Le modèle de la tectonique des plaques explique ce phénomène par les mouvements des plaques lithosphériques entre elles qui entraînent de fortes contraintes entre les plaques (Fig. IV.2) [14].



Figure IV.2 Carte des principales plaques lithosphériques. [26]

IV.4 Les frontières divergentes

Il existe au sein de l'asthénosphère des mouvements ascendants et des mouvements descendants de la matière liquide, qu'on appelle Magma. Ces mouvements de matière qui provoquent ces déplacements, sont appelés courants de convection. Cette dynamique et ce mouvement provoqué par l'asthénosphère sont la source de la tectonique des plaques.

Les grandes plaques de la lithosphère sont séparées les unes des autres par des cassures profondes qu'on appelle dorsales océaniques [3]. En se séparant les plaques laissent un vide le long des dorsales océaniques qui est vite remplie par du matériau liquide qui remonte du manteau. Ce matériau se solidifie rapidement et s'adjoint à la lithosphère de part et d'autre de la dorsale. Ainsi les plaques lithosphériques grandissent au fur et à mesure qu'elles se déplacent. Cette activité se traduit en surface par une divergence des plaques lithosphériques et une expansion de l'océan (Fig. IV.3) [14].

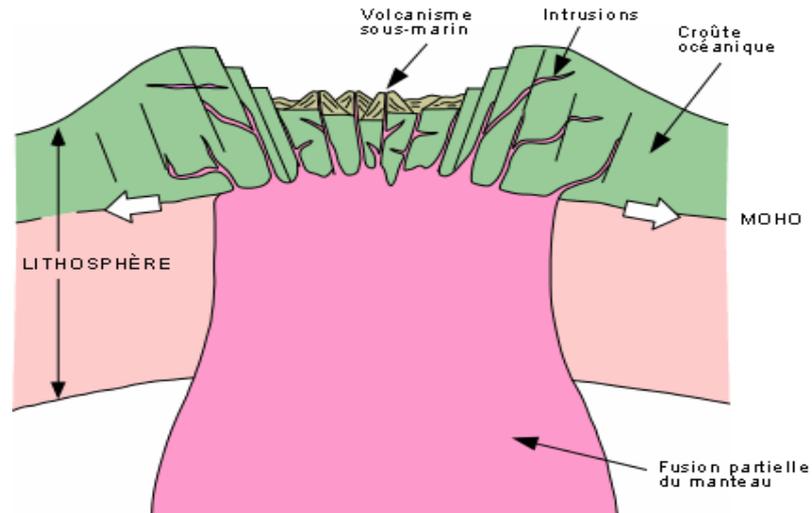


Figure IV.3 Schéma de la zone de divergence [14]

IV.4. 1 Les étapes de la formation d'un océan

- l'accumulation de chaleur sous une plaque continentale cause une dilatation de la matière qui conduit à un bombement de la lithosphère. Il s'ensuit des forces de tension qui fracturent la lithosphère et amorcent le mouvement de divergence (Fig. IV.4).
- Le magma viendra s'infiltrer dans les fissures, ce qui causera par endroits du volcanisme continental; les laves formeront des volcans ou s'écouleront le long des fissures.

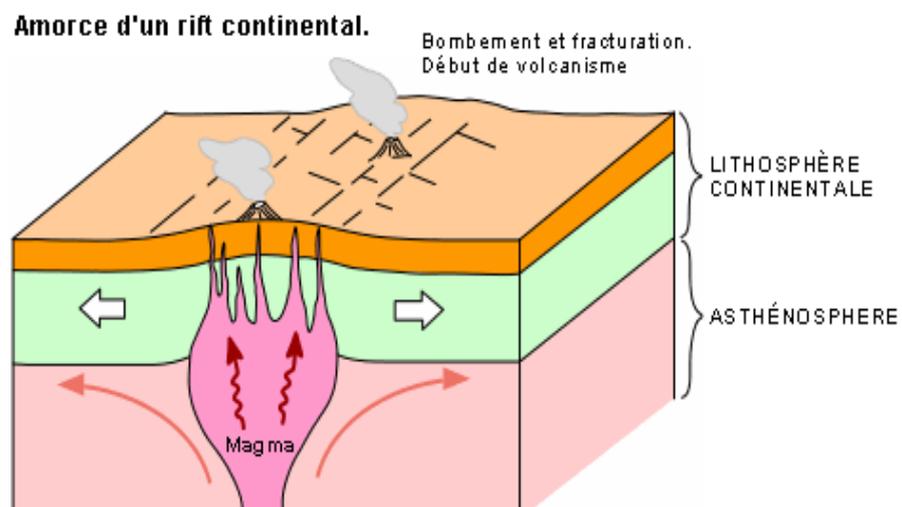


Figure IV.4 Bombement de la lithosphère [14]

- La poursuite des tensions produit un étirement de la lithosphère; il y aura alors effondrement en escalier, ce qui produit une vallée appelée un rift continental. Il y aura des volcans et des épanchements de laves le long des fractures (Fig. IV.5). Le Grand Rift africain en Afrique orientale en est un bon exemple.

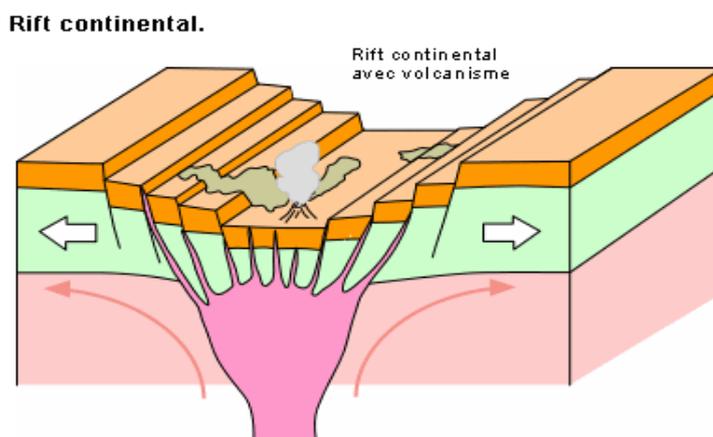


Figure IV.5 Étirement de la lithosphère avec effondrement en escalier [14]

- Avec la poursuite de l'étirement, le rift s'enfonce sous le niveau de la mer et les eaux marines envahissent la vallée. Deux morceaux de lithosphère continentale se séparent et s'éloignent progressivement l'un de l'autre .
- Le volcanisme sous-marin forme un premier plancher océanique basaltique (croûte océanique) de part et d'autre d'une dorsale embryonnaire; c'est le stade de mer linéaire, comme par exemple la Mer Rouge (Fig. IV.6).

Océan de type Atlantique

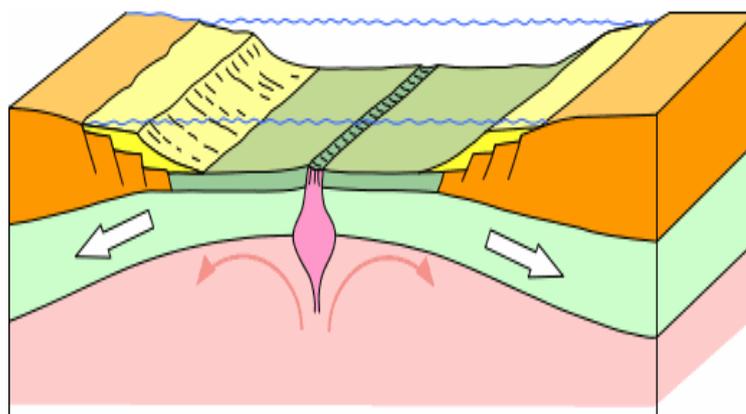


Figure IV.6 Formation du premier plancher océanique [14]

IV.5 Les frontières transformantes

Les frontières transformantes correspondent à de grandes fractures qui affectent toute l'épaisseur de la lithosphère; Elles se trouvent le plus souvent, mais pas exclusivement, dans la lithosphère océanique.

La fameuse faille de San Andreas en Californie est un bon exemple de cette situation (Fig. IV.7): elle assure le relais du mouvement entre la limite divergente de la dorsale du Pacifique-Est, la limite convergente des plaques Juan de Fuca-Amérique du Nord et la limite divergente de la dorsale de Juan de Fuca [3].

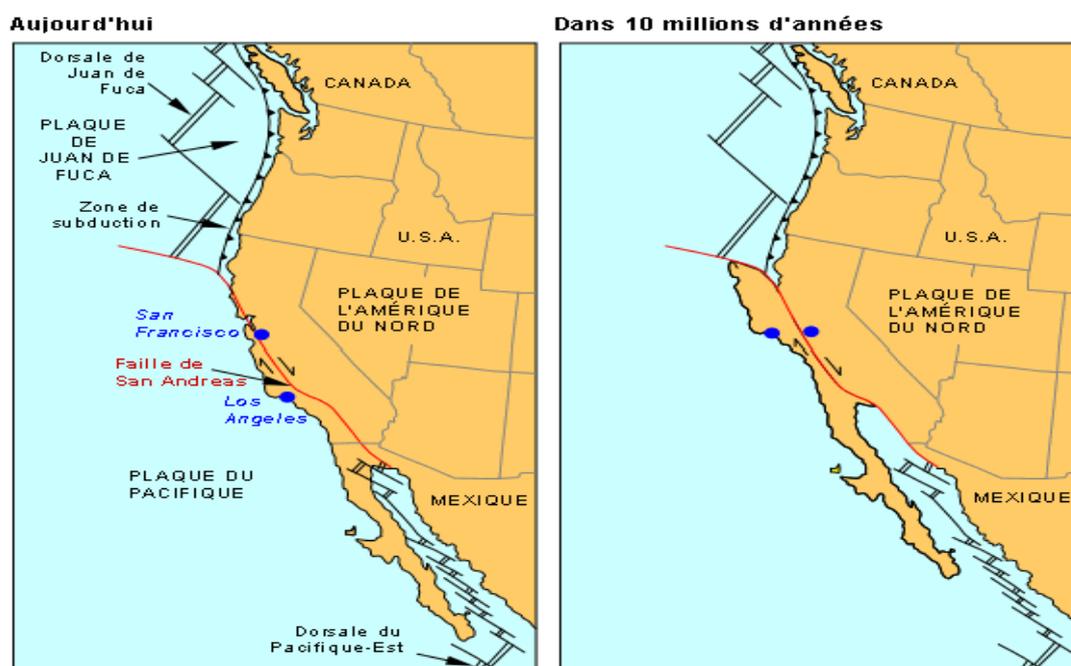


Figure IV.7 La faille transformante de San Andreas [14]

IV.6 Les séismes

Le séisme est une secousse brutale du sol provoqué en profondeur par un mouvement relatif de deux compartiments rocheux profond. Il en résulte une libération d'énergie qui c'était lentement accumulée. Une large partie de cette énergie est perdue sous forme de chaleur dans une zone appelée foyer initial et une autre partie est véhiculée sous forme d'ondes sismiques. On peut définir les termes relatifs au phénomène séismique:

Epicentre (foyer virtuel): le point le plus proche sur la surface terrestre où la secousse est maximale [4].

Hypocentre (foyer réel): le point où il y a libération de l'énergie. C'est le point de départ de la rupture sismique sur une faille (Fig. IV.8).

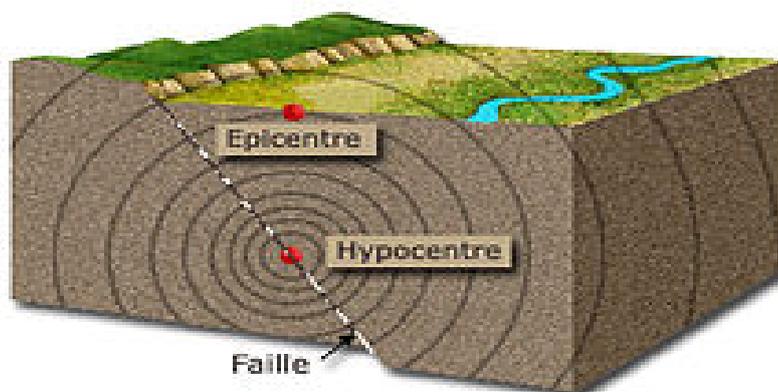


Figure. IV.8 Le Foyer d'un séisme

IV.6.1 Les type de séisme

- Superficielle : Foyer réel à moins de 60 km de profondeur
- Intermédiaire : Foyer réel entre 60 et 300 Km de profondeur
- Profond : Foyer réel entre 300 et 700 Km de profondeur

IV.6.2 Les ondes sismiques et leurs caractéristiques

Les ondes sismiques sont des ondes élastiques qui engendrent des vibrations se propageant dans toutes les directions. La vitesse de propagation des ondes sismiques est fonction de l'état et de la densité de la matière. Il existe deux grands domaines de propagations des ondes:

IV.6.2.1 Les ondes de volume

Elles se propagent à l'intérieur du globe. Leur vitesse de propagation dépend du matériau traversé et d'une manière générale elle augmente avec la profondeur. Chez les ondes de volume, on reconnaît deux grands types: les ondes de cisaillement ou **ondes S**, et les ondes de compression ou **ondes P** (Fig. IV.9).

IV.6.2.1.1 Les ondes P

Ce sont les premières arrivées, suite à un séisme. Elles se déplacent donc très vite. Ce sont des ondes compressées dans le sens de la propagation, on dit que ce sont des ondes longitudinales de compression et de décompression. Elles se déplacent dans les solides et les fluides. Elles sont responsables du grondement sourd que l'on peut entendre au début d'un tremblement de terre.

IV.6.2.1.2 Les ondes S

Les ondes secondaires. Ce sont les plus difficiles à distinguer sur la composante verticale. Elles ont une amplitude moyenne à forte. Ces ondes ne se propagent pas à travers les liquides, donc elles ne sont pas toujours observables sur les sismogrammes. Ce sont des ondes transversales de cisaillement. Elles sont donc les plus dangereuses pour les constructions humaines. [27]

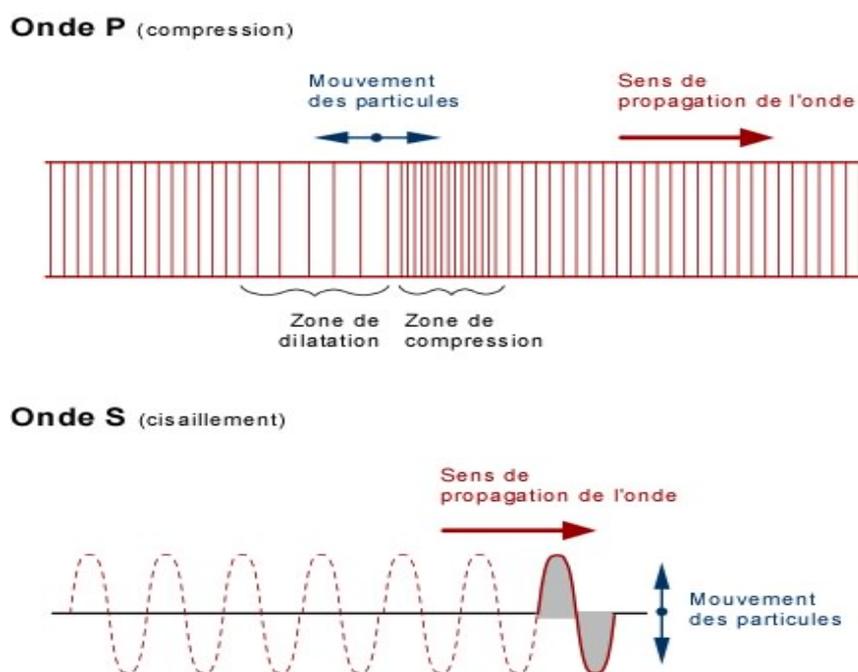


Figure. IV.9 Les ondes de volume [27]

IV.6.2.2 Les ondes de surfaces

Celles qui se propagent à la surface du globe, dans la croûte terrestre, et qui causent tous ces dommages associés aux tremblements de terre (Fig. IV.10). On distingue :

IV.6.2.2.1 Les ondes L

Ondes de Love. Ce sont des ondes de surface qui se déplacent perpendiculairement au foyer. Elles provoquent des cisaillements uniquement dans le plan horizontal. Elles sont donc perpendiculaires aux ondes S. Elles peuvent être aussi très dangereuses pour les constructions. Leurs déplacement est essentiellement le même que celui des ondes S sans mouvement vertical. Les ondes de Love provoquent un ébranlement horizontal qui est la cause de nombreux dégâts aux fondations des édifices [27].

IV.6.2.2.2 Les ondes R

Ondes de Raleigh. Elles déplacent le sol d'un côté à l'autre dans un plan horizontal perpendiculairement à sa direction de propagation. Elles sont assimilables à une vague dans le sens où les molécules du sol se déplacent dans celui-ci comme les molécules d'eau dans une vague.

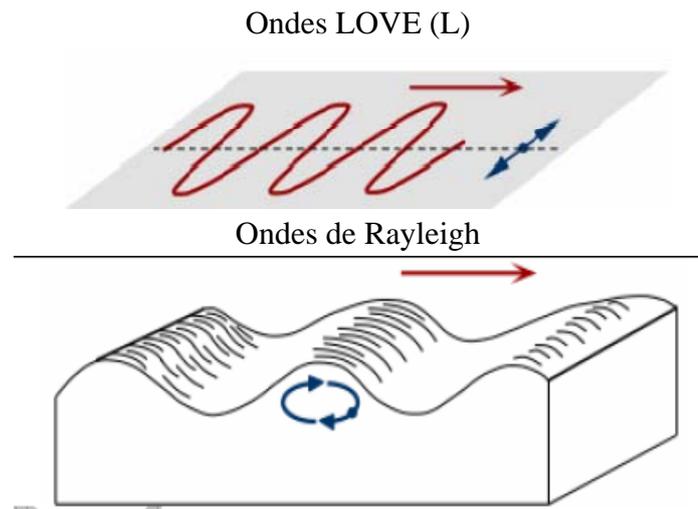


Figure IV.10 Les ondes de surfaces [27]

IV.6.3 Comportement des ondes sismiques dans le globe terrestre

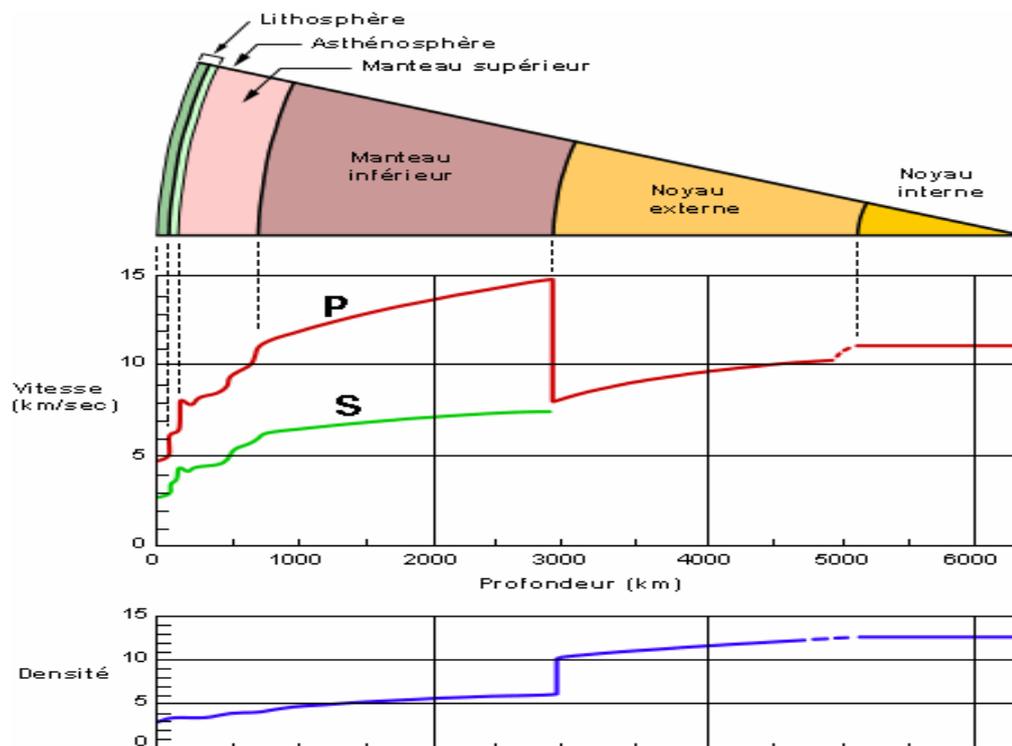


Figure IV.11 Evolution des ondes sismiques dans le globe terrestre

Sur la figure. IV.11, on peut observer l'évolution de la vitesse de propagation des ondes P et S en fonction des couches internes du globe qu'elles traversent :

- La vitesse des deux types d'ondes augmente de manière relativement constante jusqu'à une profondeur de 3000km, donc les roches traversées deviennent de plus en plus denses, du fait de la pression plus intense.

- Au passage du manteau inférieur au noyau externe, la vitesse des ondes P diminue de moitié, chutant à des valeurs voisines de 7km/s, et les ondes S sont brutalement stoppées. On remarque par ailleurs qu'à ce point la densité augmente brusquement.

La cause de ces brusques changements dans le comportement des ondes est due à un changement des propriétés chimiques des milieux traversés : bien que la densité soit plus élevée, le milieu traversé est plus fluide, ce qui contribue à ralentir les ondes [27].

IV.6.4 La puissance d'un séisme

La puissance d'un séisme se mesure par son intensité et son amplitude ou magnitude suivant l'échelle de Richter. L'intensité sismique permet de mesurer les effets d'un séisme, à un endroit donné, sur des objets naturels, sur des installations industrielles et sur les êtres humains. L'intensité diffère de la magnitude, qui est liée à l'énergie relâchée par un séisme.

L'échelle de Richter comporte 12 degrés (notés en chiffres romains pour ne pas confondre avec la magnitude).

Tableau IV.1 Echelle de mesure de l'intensité d'un séisme [27]

Degrés	Observations
I	Seuls les sismomètres enregistrent les vibrations.
II	Secousses à peine perceptibles.
III	Vibrations comparables au passage d'un petit camion. Léger balancement des objets suspendus.
IV	Vibrations comparables au passage d'un gros camion ; perception dans et hors des maisons, tremblement d'objets
V	Séisme ressenti en plein air. Objets renversés ou déplacés. Les dormeurs se réveillent. Quelques dommages aux bâtiments.
VI	Les meubles lourds peuvent se déplacer. Frayeur des personnes. Certaines personnes perdent l'équilibre.
VII	Dommages aux constructions : fissures et lézardes apparaissent dans les murs. Chutes de cheminées.
VIII	Destructions de plusieurs bâtiments. Des murs de pierres peuvent s'effondrer.
IX	Destructions généralisées des édifices. Les maisons s'écroulent. Les fissures dans le sol peuvent atteindre quelques centimètres.
X	Destructions généralisées des bâtiments. Destructions des ponts et digues. Les rails de chemins de fer sont tordus.
XI	Les constructions les plus solides sont détruites (ponts, barrages...). Grands éboulements. Terrains déformés.
XII	Les villes sont rasées. Bouleversements dans le paysage. Énormes fissures avec observation de déplacements horizontaux ou verticaux du sol.

IV.6.5 La répartition des tremblements de terre à la surface de la planète

Les séisme n'ont pas une répartition aléatoire à la surface de la planète, mais sont répartis selon un patron bien défini. On retrouve les séismes surtout aux frontières des plaques lithosphériques.

Les séismes se répartissent le long de courbes fermées, qui divisent le globe en de grandes régions océaniques et continentales, plus ou moins dépourvues d'activité sismique, ou « plaques », satisfaisant ainsi la théorie de la tectonique des plaques. Il existe une sismicité diffuse en dehors de ces limites (sismicité intraplaque) mais presque tous les séismes ont lieu aux frontières de ces plaques. On parle alors de séismes tectoniques. On remarque que les épicentres des séismes récents se répartissent en trois zones principales :

- la zone péripacifique (pourtour du Pacifique) et la boucle des Antilles, qui représentent 80% de l'activité sismique annuelle,
- les zones de dorsale océanique,
- une zone située à la limite des continents Eurasiatique et Africain, des Açores à Java.

Entre ces zones de forte sismicité existent de vastes zones presque entièrement asismiques, océaniques ou continentales comme le Canada, la Sibérie, l'Afrique de l'Ouest, l'Australie, une partie de l'Ouest du continent Américain et le nord de l'Europe (Fig. IV.12) [35]

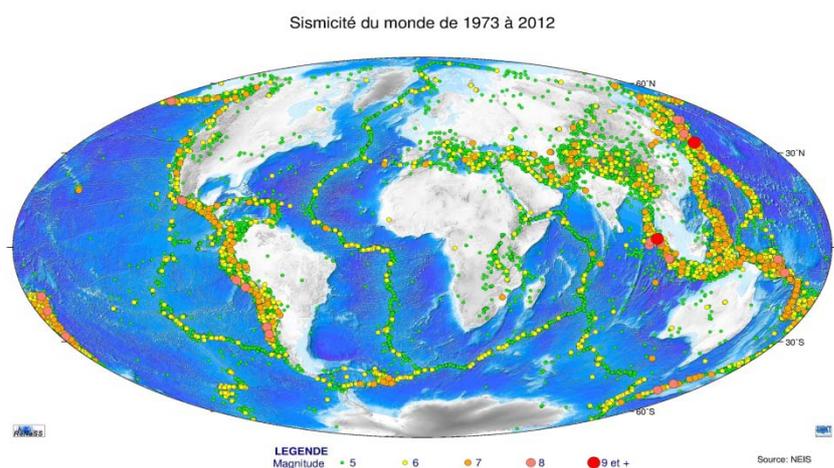


Figure IV.12 La sismicité du monde [35]

IV.6.5 La répartition de la sismicité en Algérie

La région d'Alger est liée au contexte géodynamique de la Méditerranée occidentale conséquence de la collision entre la plaque eurasiatique –Afrique. C'est l'une des régions d'Algérie où les déformations sont lentes et les plus actives et où l'activité sismique diffuse et modérée est souvent de magnitude ne dépassant pas V degrés mais produit parfois de rares séismes forts. La tectonique récente en Algérie du Nord, et plus particulièrement dans le Tell, exprime la poursuite de la déformation en compression de la bordure septentrionale de la plaque africaine [36]. En effet, les séismes en Algérie du Nord sont produits généralement par des plis-failles ou failles inverses de direction NNE–SSW (Fig. IV.13).

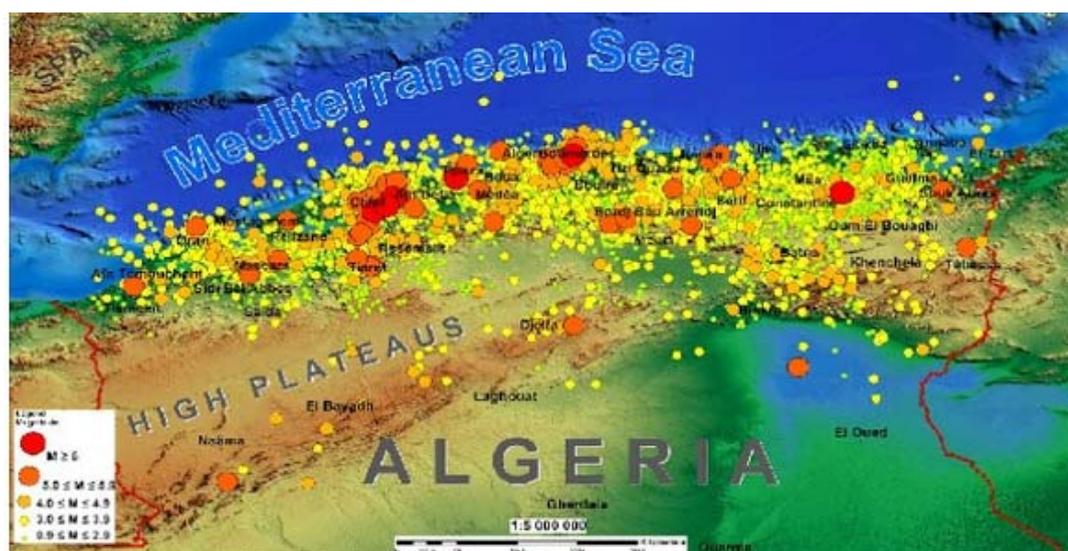


Figure IV.13 L'activité sismique au nord de l'Algérie [36]

IV.7 Les 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 [1].

IV.7.1 Structures et reliefs d'un volcan

Un volcan est formé de différentes structures que l'on retrouve en général chez chacun d'eux (Fig. IV.14):

- 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.

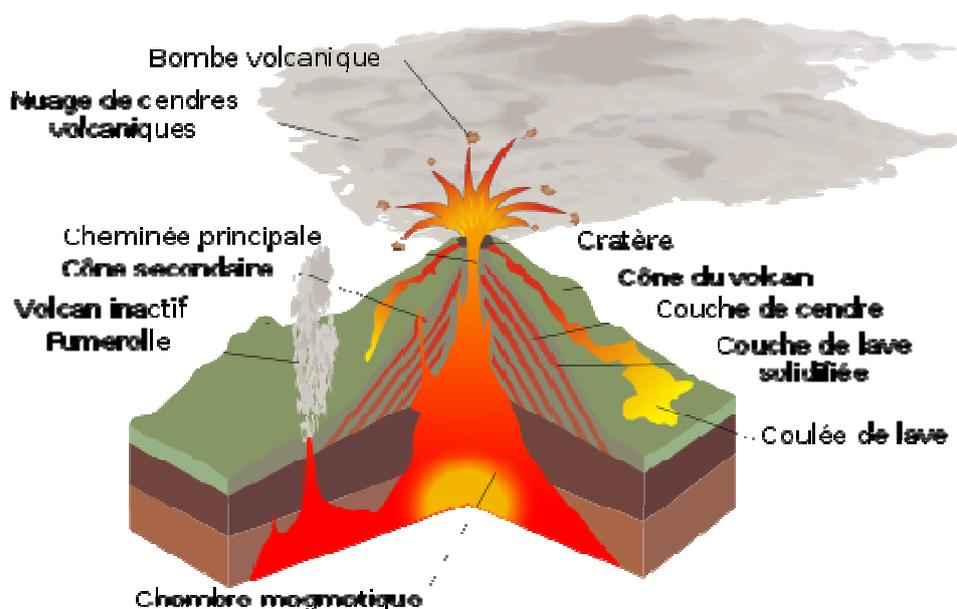


Figure IV.14 Structures et reliefs d'un volcan [28]

IV.7.2 Différents types de volcans

Il existe au monde deux types :

- Les volcans effusifs, ou « volcans rouges », aux éruptions relativement calmes qui émettent des laves fluides sous la forme de coulées. Ce sont les volcans de « point chaud », et les volcans des dorsales océaniques ;
- Les volcans explosifs, ou « volcans gris », aux éruptions explosives qui émettent des laves pâteuses et des cendres sous la forme de nuées ardentes. Ils sont principalement associés au phénomène de subduction comme les volcans de la ceinture de feu du Pacifique[28].

IV.7.3 Origine du volcanisme

Le volcanisme est lié aux mouvements des plaques tectoniques. En général, à la frontière entre deux plaques que les conditions sont réunies pour la formation de volcans.

IV.7.3.1 Volcanisme de divergence

Dans le rift des dorsales, l'écartement de deux plaques tectoniques amincit la lithosphère, entraînant une remontée de roches du manteau. Celles-ci, déjà très chaudes à environ 1 200 °C, se mettent à fondre partiellement en raison de la décompression. Cela donne du magma qui s'infiltre par des failles normales. Entre les deux bords du rift, des traces d'activités volcaniques

telles que des laves en coussin se forment par une émission de lave fluide dans une eau froide. Ces roches volcaniques constituent ainsi une partie de la croûte océanique (Fig. IV.15).

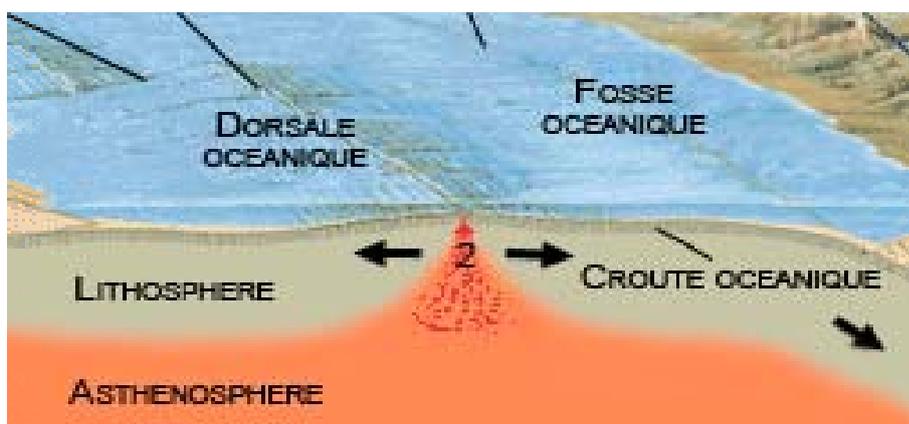


Figure. IV.15 *Volcanisme de divergence* [25]

IV.7.3.2 Volcanisme de subduction

Lorsque deux plaques tectoniques se chevauchent, la lithosphère océanique, glissant sous l'autre lithosphère océanique ou continentale, plonge dans le manteau et subit des transformations minéralogiques. L'eau contenue dans la lithosphère plongeante s'en échappe alors et vient hydrater le manteau, provoquant sa fusion partielle en abaissant son point de fusion. Ce magma remonte et traverse la lithosphère chevauchante, créant des volcans (Fig. IV.16).

Si la lithosphère chevauchante est continentale, les volcans se situeront sur le continent, en général dans une cordillère. C'est le cas des volcans des Andes ou des Rocheuses.

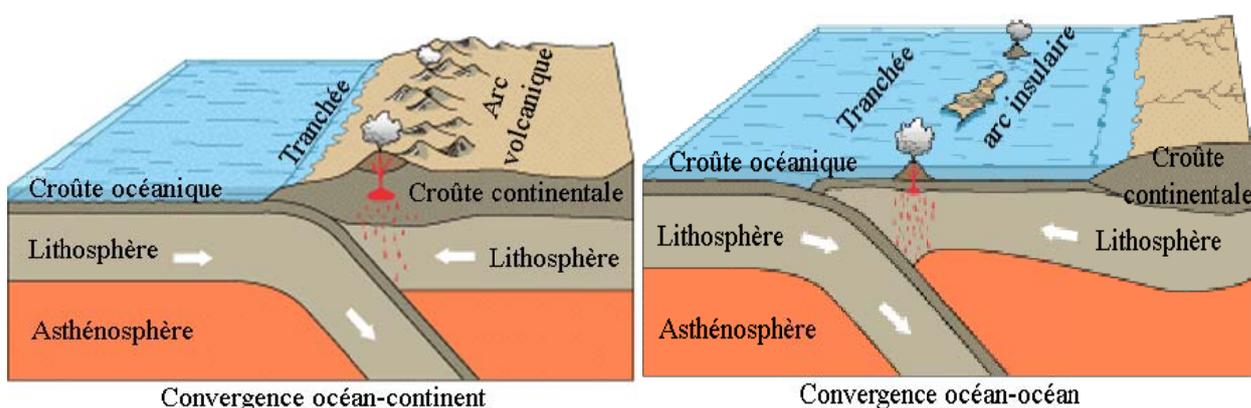


Figure IV.16 *Volcanisme de subduction*

IV.7.3.3 Volcanisme de point chaud

Parfois, des volcans naissent loin de toute limite de plaque lithosphérique. Ils sont en général interprétés comme des volcans de point chaud. Les points chauds sont des panaches de magma venant des profondeurs du manteau et perçant les plaques lithosphériques.

Les points chauds étant fixes, alors que la plaque lithosphérique se déplace sur le manteau, des volcans se créent successivement et s'alignent [25]. Lorsque le point chaud débouche sous un océan, il va donner naissance à un chapelet d'îles alignées comme c'est le cas pour l'archipel d'Hawaï. Si le point chaud débouche sous un continent, il va alors donner naissance à une série de volcans alignés. C'est le cas du mont Cameroun et de ses voisins (Fig. IV.17).

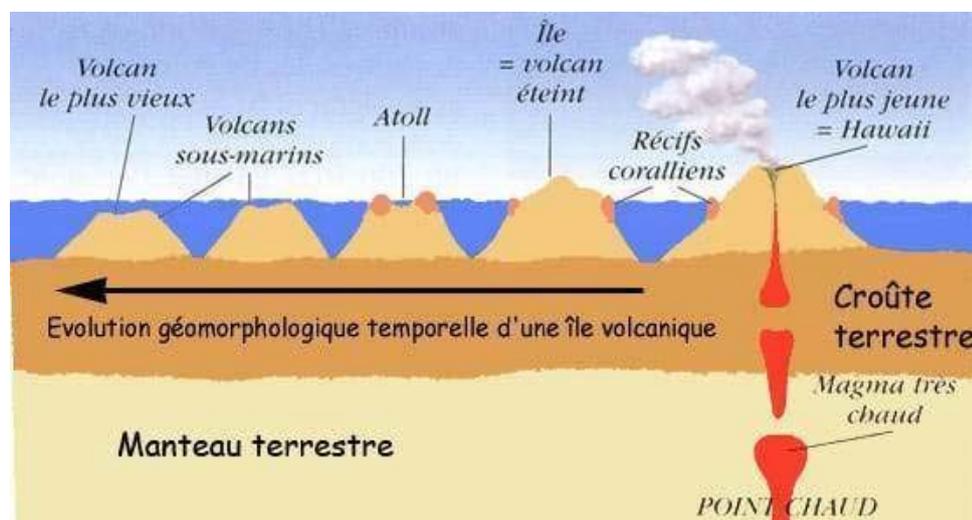


Figure. IV.17 Point chaud sous un océan

III.8 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, et sont l'expression de mouvements de convection dans le manteau terrestre ; leur origine est totalement indépendante de l'homme. 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.

*Chapitre V: Adaptation des techniques géologiques
aux besoins du génie civil*

V.1 Généralités et définitions

La Cartographie est l'ensemble des études et opérations scientifiques, artistiques et techniques intervenant à partir d'observations directes ou de l'exploitation d'un document en vue d'élaborer des cartes, plans et autres moyens d'expression.

Une carte (du grec « *Khartès* » : *feuille de papyrus*): est une image, la représentation conventionnelle d'un phénomène dans l'espace. C'est un dessin à plat, en général sur papier ou sur des supports très divers : bois, verre, métal, plastique, écran d'ordinateur [1].

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

La topographie (du grec « *topos* » qui signifie *lieu* et de « *graphen* » signifiant *décrire*): est une description graphique, une représentation sur un support plan d'une portion de la surface terrestre, avec sa configuration.

V.2 La carte topographique

La carte topographique est l'outil de travail du géographe et du géologue, établie et éditée par les divers services topographiques ou «géographiques» [1].

Les cartes topographiques figurent essentiellement les résultats des observations topographiques (configuration de l'espace).

La carte topographique est construite à partir de photographies aériennes dont on a volontairement enlevé les détails pour faciliter la lecture. Ces cartes contiennent deux ordres de renseignements :

- Le tracé des cours d'eaux et des routes, l'emplacement des bois, des édifices (maisons, églises, châteaux,...)
- Le figuré du relief, sur les cartes actuelles, la topographie est indiquée par des courbes de niveaux.

Les courbes de niveau sectionnent le relief par des plans horizontaux équidistants que l'on projette ensuite sur un plan (Fig. V.1). La distance verticale entre deux plans définit l'équidistance des courbes.

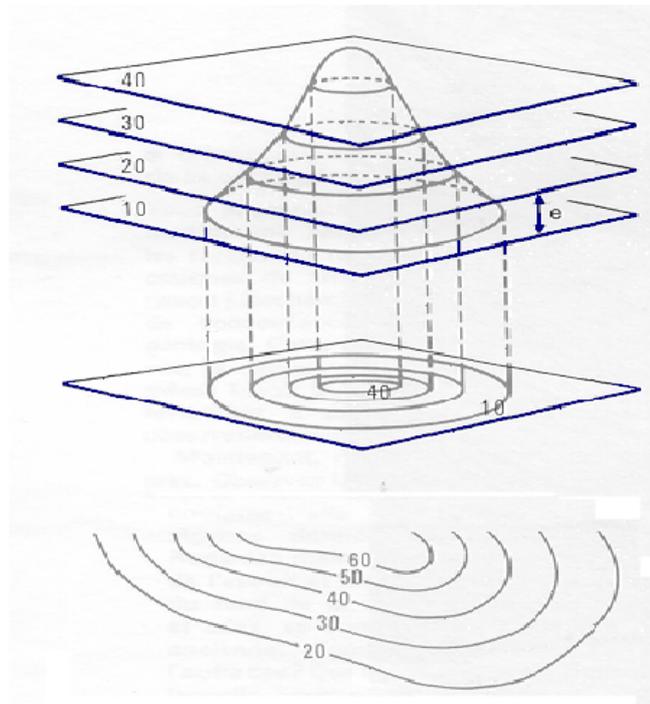


Figure V.1 La projection des courbes de niveaux [3]

V.3 Les modes de représentation du relief sur les cartes topographiques

Il en existe deux types : les hachures et les courbes de niveau.

V.3.1 Les hachure

Le relief est figuré par des segments de droite tracés selon la ligne de plus grande pente du lieu considéré. On pourrait imaginer cette définition en disant que les hachures représentent le tracé des eaux qui ruissellent à la surface du sol, donc nécessairement selon les pentes les plus fortes. Les lignes figurant le relief sont parallèles à la pente, tandis que les courbes de niveau lui sont perpendiculaires.

V.3.2 Les courbes de niveau

Une courbe de niveau est une ligne imaginaire qui joint tous les points d'un relief situés à la même altitude au-dessus du niveau de la mer. En d'autres termes, c'est la trace d'un plan horizontal coupant les surfaces gauches constituées par les pentes d'un relief.

V.3.2.1 Différentes types de courbes de niveau

Il existe trois types de courbes de niveau (Fig. V.2):

V.3.2.1 Les courbes maîtresses

Elles sont cotées et figurées par un trait plus épais que le tracé de toutes les autres courbes;

V.3.2.2 Les courbes secondaires

Appelées également *courbes normales*, ces courbes s'intercalent entre les courbes maîtresses et sont figurées par un trait moins épais;

V.3.2.3 Les courbes intercalaires

Elles sont représentées par un trait discontinu (Fig. V.2).

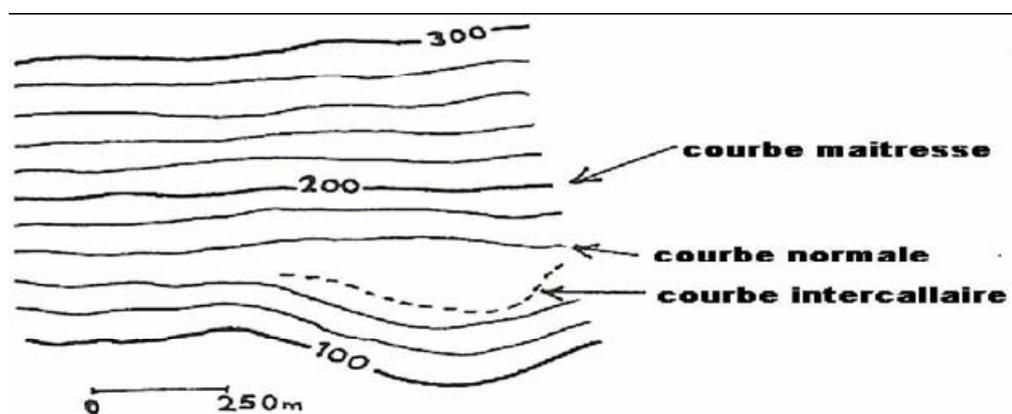


Figure V.2 Différents types de courbes de niveau [3]

V.3.2.2 La densité des courbes de niveau

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

V.3.2.3 Les points cotés

A côté des courbes de niveau, il existe un certain nombre de points remarquables où l'altitude exacte est donnée, permettant de trouver facilement la valeur des courbes de niveau proches (Fig. V.3).

Exemple : soit une carte où l'équidistance des courbes est de 10m, supposons qu'au sommet d'une butte (sommet) il y ait un point coté 274m, la 1ère courbe entourant ce sommet et donc de valeur inférieure sera la courbe 270 car elle sera un multiple de 10.

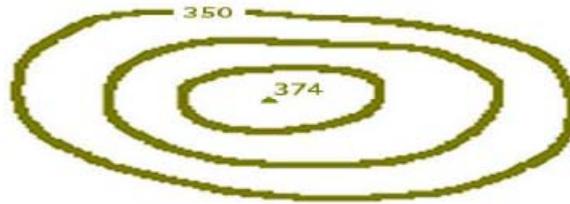


Figure V.3 Les points cotés [3]

V.3.2.4 Caractéristiques des courbes de niveau

V.3.2.4.1 L'équidistante

On appelle équidistance la distance verticale constante qui sépare deux courbes de niveau consécutives. L'équidistance n'est pas la même sur toutes les cartes, mais elle est mentionnée sur les toutes les cartes. [29]

V.3.2.4.2 Les cotes

La lecture d'une carte serait difficile si les courbes de niveau restaient « anonymes » : Il faut qu'elles permettent, outre l'appréciation des pentes, la détermination des altitudes. Il est donc convenu que certaines d'entre elles soient cotées, c'est-à-dire que des chiffres interrompent leur continuité, indiquant ainsi leur altitude absolue [30]. Ces courbes privilégiées sont dites « maîtresses ». Il faut quand même remarquer que certains points caractéristiques sont également cotés : sommet isolé, crête, col, etc.

V.3.2.4.3 Les signes des cartes

Les courbes de niveau sont complétées par d'autres signes. Deux procédés sont utilisés.

Le premier est le « *figuré des escarpements rocheux* » : face à la raideur et à l'irrégularité des pentes, le dessinateur représente la pente telle qu'elle lui apparaît à l'examen des photographies aériennes.

Le second est l'estompage : pour pallier l'inconvénient du caractère peu suggestif des courbes de niveau représentant les formes d'ensemble, on fait des blocs-diagrammes en plâtre, par exemple, appelés estompages).

Les cartes topographiques en hachures sont actuellement abandonnées et remplacées par les cartes en courbes de niveau.

V.4 La lecture de la carte

Lire une carte revient à interpréter ses différentes données (légende, échelle, orientation, coordonnées géographiques, signes conventionnels, figurés divers) de manière à imaginer le paysage qu'elle représente.

V.4.1 L'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 [1].

Autrement dit, l'échelle d'une carte (E) est le rapport de la longueur mesurée sur la carte (L_c), en une unité donnée, à la distance horizontale correspondante sur le terrain (L_t), à la même unité (Fig. V.4):

$$E = L_c/L_t \quad (V.1)$$

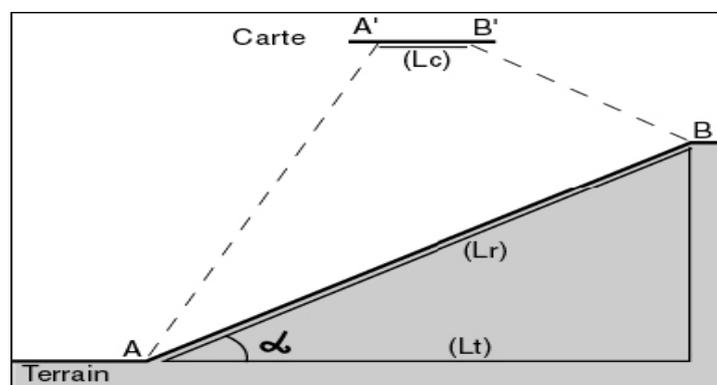


Figure V.4 L'échelle d'une carte (E) [9]

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).

L'échelle d'une carte est fonction de (L_t) (appelée aussi distance à vol d'oiseau), qui est la projection sur un plan horizontal de la distance réelle sur le terrain (L_r). Cette dernière est fonction de la pente topographique (α) selon la formule:

$$(L_r) = (L_t)/\text{Cos}\alpha \quad (V.2)$$

La précision d'une carte dépend de l'échelle du levé et non de son agrandissement. Autrement dit, agrandir une carte (par exemple par photocopie) n'améliore en rien sa précision.

L'échelle (E) peut aussi être représentée graphiquement par un segment gradué, permettant de lire directement la distance réelle correspondant à une certaine longueur sur la carte.

L'échelle graphique a pour avantages une conversion plus rapide des longueurs mesurées et surtout de rester valable après agrandissement ou réduction de la carte (Fig. V.5).

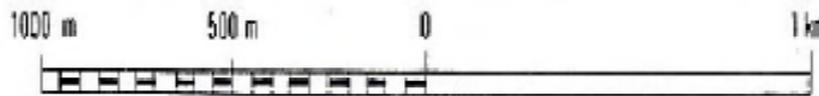


Figure V.5 L'échelle graphique [9]

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

V.4.1.1 Carte à grande échelle

Une carte est dite à grande échelle quand la réduction qu'elle permet est faible, donc quand le dénominateur est petit. Dans ce cas, l'espace cartographié est peu étendu. Parmi les cartes à grande échelle, les principales éditées sont le $1/10\ 000^{\text{e}}$ et le $1/25\ 000^{\text{e}}$. Les cartes à $1/50\ 000^{\text{e}}$ et à $1/100\ 000^{\text{e}}$ sont appelées cartes à moyenne échelle. [29]

V.4.1.1.2 Carte à petite échelle

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

- Lorsque la carte représente le monde entier, on parle de *planisphère*.
- Une mappe monde est aussi une représentation du monde entier, mais avec séparation en deux hémisphères.
- Les plans sont quant à eux des cartes à très grande échelle. Ex : plan de maison à $1/100$, cadastre à $1/1000$.

V.4.2 La légende

La légende est un symbolisme figuratif conventionnel ou non qui montre sur la carte divers objets et phénomènes localisés sur l'espace géographique. Elle comporte deux grandes catégories de signes. Il s'agit des signes altimétriques et des signes planimétriques [29].

V.4.2.1 Les signes altimétriques

Ils sont constitués essentiellement par les points cotés et les courbes de niveau. Ils évoquent donc les variations d'altitude dans un espace cartographié.

V.4.2.2 Les signes planimétriques

Ils figurent les objets et les phénomènes naturels ou anthropiques localisables sur une petite ou grande surface. On peut citer entre autres:

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

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

V.4.2.3 Le système d'orientation

Une carte comporte nécessairement une orientation. Celle-ci est faite avec une direction s'exprimant par un angle ou « gisement » ou « azimut » calculé à partir du Nord.

On distingue trois Nord sur les cartes : le *Nord géographique*, le *Nord cartographique* et le *Nord magnétique*.

- Le *Nord géographique* ou *Nord astronomique* est la direction indiquée par le plan des méridiens ;
- Le *Nord cartographique* ou *Nord Lambert* est donné par les méridiens du carroyage et fait un angle variable avec les méridiens géographiques.

- Le *Nord magnétique* est indiqué par l'aiguille aimantée. Il forme un angle (ou déclinaison magnétique) qui varie avec le temps par rapport au Nord géographique. La valeur de la déclinaison magnétique à la date de publication de la carte est donnée pour le point central de la feuille avec sa diminution annuelle en minutes centésimales (divisées en cent parties) ou en grades.

V.5 Le profil topographique

Un profil topographique est une section par un plan vertical de la surface topographique, ce profil qui sera représenté à une certaine échelle, doit rendre compte des formes du relief.

C'est l'intersection de la surface du sol par un plan vertical (Fig. V.6). 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.

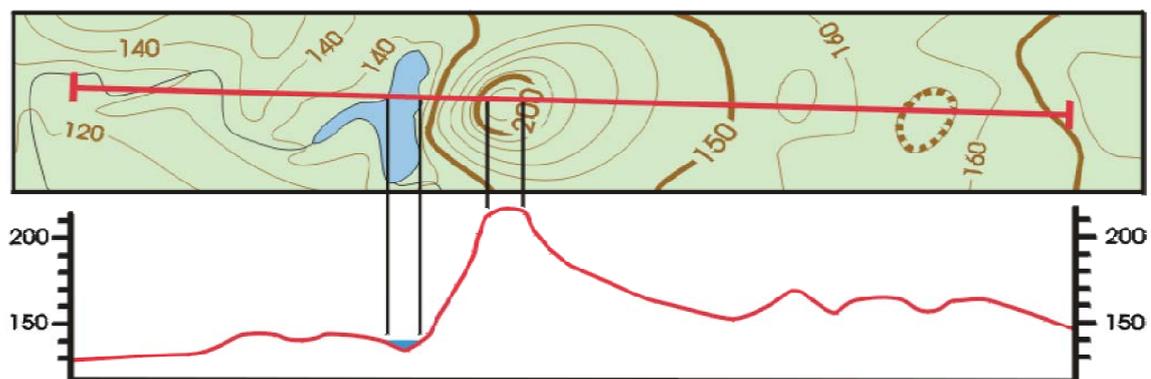


Figure V.6 Profil topographique [30]

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.

V.5.1 Exécution du profil topographique

Une coupe topographique permet de figurer l'allure du relief de manière schématique et de donner alors une vue suggestive d'un relief caractéristique d'une région donnée.

Exécuter un profil topographique consiste à dessiner une courbe en coordonnées rectangulaires en mettant en ordonnées les hauteurs et en abscisses les longueurs ou distances [30].

V.5.1.1 Le choix des échelles

- *Echelle des longueurs* : il faut éviter de modifier l'échelle des longueurs tant qu'on y est pas invité. Il est généralement recommandé de conserver l'échelle de la carte, la coupe devenant alors plus facile à effectuer. Toutefois, ce choix n'a rien d'obligatoire.

- *Echelle des hauteurs* : son choix est personnel mais il convient en général d'exagérer l'échelle des hauteurs par rapport à celle des longueurs, à l'exception des zones de hautes montagnes. Mais on réserve en général :

- le 1/10 000^e pour les régions de faibles dénivellations, de faibles ruptures de pente comme les plaines ;

- le 1/20 000^e pour les plateaux d'altitudes modérées et les régions de collines ;

- les 1/40 000^e et 1/50 000^e pour les régions de hauts plateaux et les zones de montagnes.

Il est recommandé, avant de choisir l'échelle des hauteurs, de calculer la dénivellation, c'est-à-dire la différence d'altitude entre les deux points cotés, le plus élevé et le plus bas. De la valeur de la dénivellation dépend en grande partie le choix de l'échelle des hauteurs [30].

Généralement, lorsque la dénivellation (D) est :

- inférieure ou égale à 250 m, on prend le 1/10 000^e ;

- comprise entre 251 m et 350 m, on prend le 1/20 000^e ;

- comprise entre 351 m et 450 m, on prend le 1/40 000^e ;

- supérieure à 450 m, on prend le 1/50 000^e.

V.5.2 Principe d'exécution d'un profil topographique

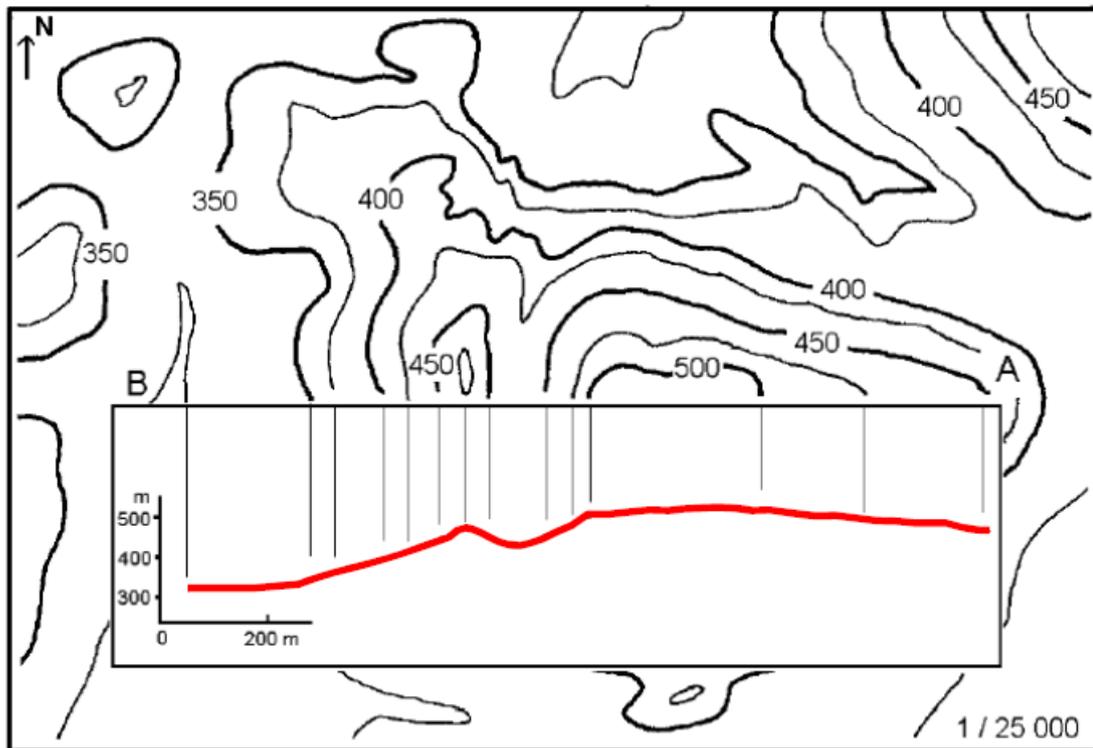


Figure V.7 Réalisation du profil topographique [9]

- 1) On trace un trait AB (Fig. V.7) sur une carte à l'échelle E (donnée)
- 2) Ensuite sur un rectangle de papier millimétré on trace 2 axes perpendiculaires, celui des abscisses correspondra à l'échelle des longueurs, celui des ordonnées à l'échelle des hauteurs (altitude).
- 3) Choisir l'origine de l'axe des hauteurs en fonction de l'altitude la plus basse.
- 4) Faire coïncider le bord supérieur du papier millimétré contre le trait de coupe AB. Marquer sur ce papier les points A'B' homologues de A et B, ensuite noter les altitudes de ces points et celles des points d'intersection des courbes de niveau avec le trait AB ; ceux-ci étant destinés à disparaître, les inscrire légèrement.
- 5) Ces points sont abaissés (projetés) à leur altitude correspondante lue sur l'axe des hauteurs précédemment dessiné.
- 6) Ces points ainsi abaissés seront reliés entre eux, non pas des segments de droite, mais par des courbes rendant compte au mieux de la topographie, les versants avec leur concavité et leur convexité au bon endroit, indiquer les sommets ou les vallées avec leur forme.
- 7) terminer la coupe en notant au dessus du profil la toponymie et l'orientation.

- 8) Orientation du profil : pour l'orientation du profil se reporter à la rose des vents (Fig. V.8); il faut la dessiner sur un papier transparent, cette rose doit être placée au centre de la coupe de façon que la direction NS soit parallèle au méridien le plus proche du trait de coupe.

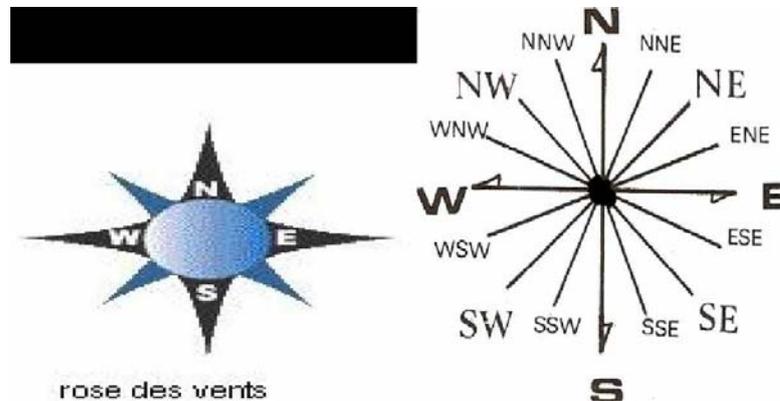


Figure V.8 La rose des vents [30]

On complète la coupe par des éléments nécessaires à son identification. Il s'agit de :

- son orientation, en général au-dessus de la coupe, en utilisant les points cardinaux ;
- les points principaux par où passe la coupe : point de départ, point d'arrivée, et points de repères (villages, rivières, voies de communication importantes, etc.) sur toute la longueur de la coupe ;
- le nom de la feuille ;
- les échelles de longueur et de hauteur utilisées.

On passe ensuite au commentaire du profil topographique réalisé.

V.6 Lignes caractéristiques en courbes de niveau

V.6.1 Formes des versants

Un versant est la zone reliant une ligne de faite à une ligne de thalweg, il peut être décomposé en un certain nombre d'éléments.

V.6.1.1 Pente constante

Lorsque les courbes de niveau sont régulièrement espacées (Fig. V.9)

- _ Plus la pente est forte, plus les courbes de niveau sont rapprochées
- _ Plus la pente est faible, plus les courbes de niveau sont écartées.

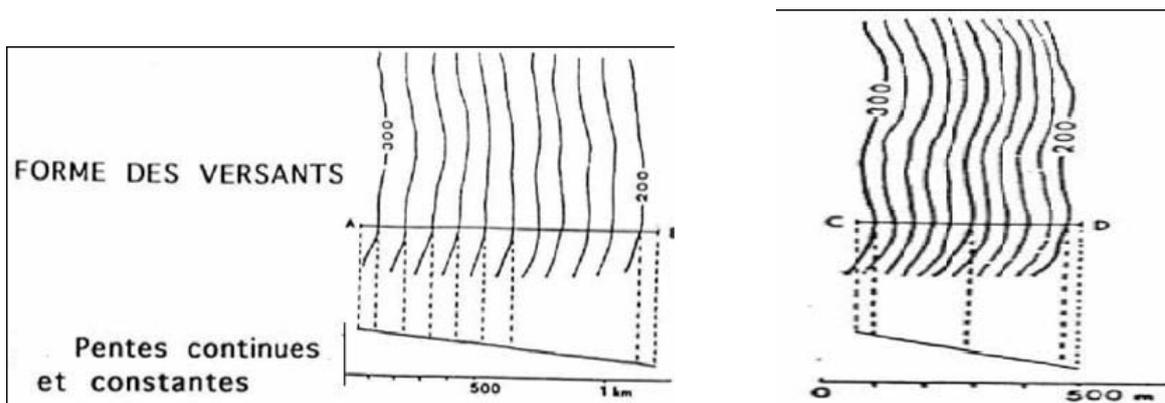
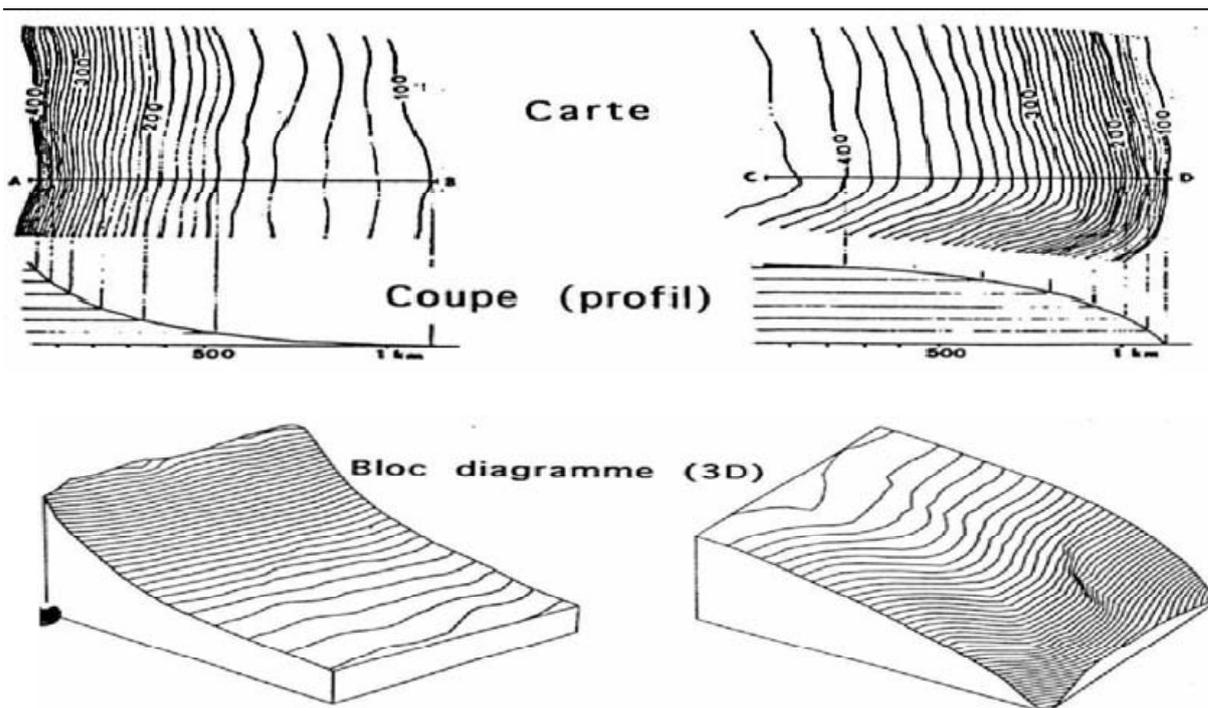


Figure V.9 Pente constante [30]

V.6.1.2 Pente régulièrement variable

Une pente concave vers le haut est caractérisée par des courbes de niveau de plus en plus écartées en allant vers le bas (Fig. V.10a).

Une pente convexe vers le haut est caractérisée par des courbes de niveau de plus en plus serrées en allant vers le bas (Fig. V.10b).



a) Pente concave

b) Pente convexe

Figure V.10 Pente régulièrement variable [30]

V.6.1.3 Pentes à variation brusques

Rupture de pente, abrupts et falaises. L'écartement des courbes de niveau change brusquement (Fig. V.11).

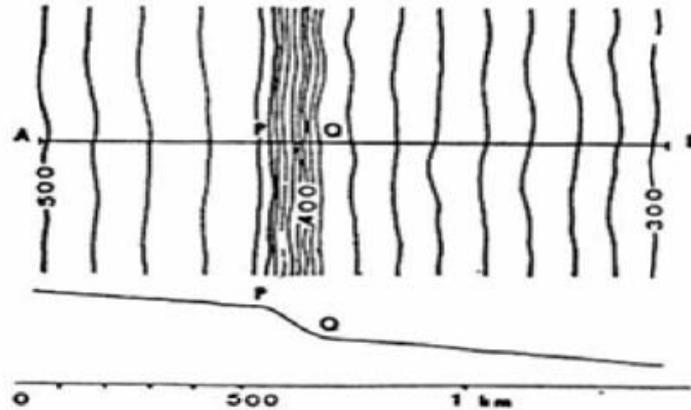


Figure V.11 Rupture de pente [4]

V.6.1.3.1 Les falaises

Lorsque la pente topographique est très forte, la densité des courbes est si grande qu'elles se touchent. Elles arrivent à se confondre et deviennent illisibles. Pour remédier à cet inconvénient on utilise un figuré spécial qui évoque une falaise rocheuse (Fig. V.12).

- la hauteur de l'abrupt = l'altitude de son sommet – l'altitude de sa base
- Il n'y a pas de continuité des courbes de niveau de part et d'autre de la falaise
- Il est très important d'orienter convenablement les falaises c'est-à-dire de dessiner l'abrupt du bon côté. Pour cela il faut déterminer parfaitement le sommet et la base de la falaise. [30]

Détermination du sommet :

- lorsqu'il y a des points cotés, ils sont généralement placés sur la crête,
- le sommet correspond le plus souvent à un replat et les courbes de niveau y sont donc rares et largement espacées.

Détermination de la base :

- La pente qui se trouve au pied de falaise est en général forte et concave vers le haut.
- Elle est souvent creusée de nombreux ravins.
- Le pied est moins marqué que le sommet à cause de l'accumulation d'éboulis.

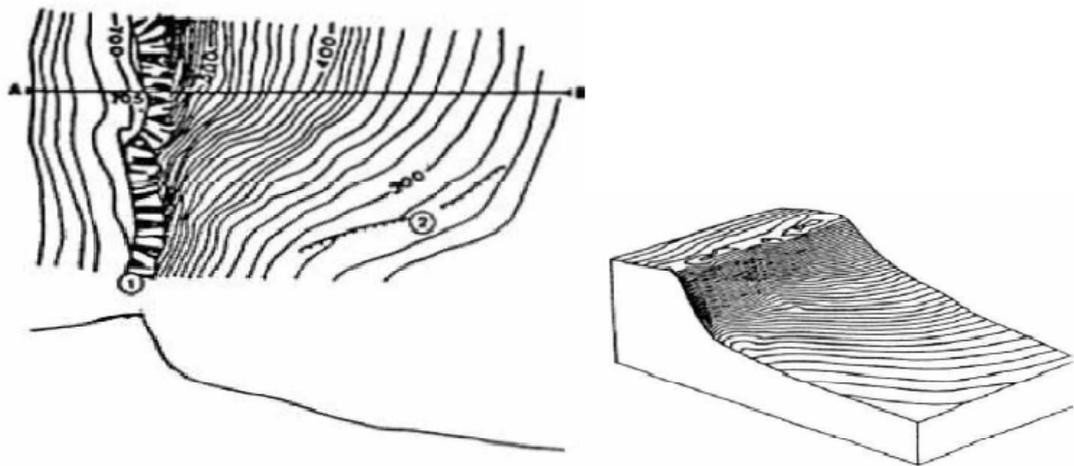


Figure V.12 Abrupts (2) et falaises (3) [30]

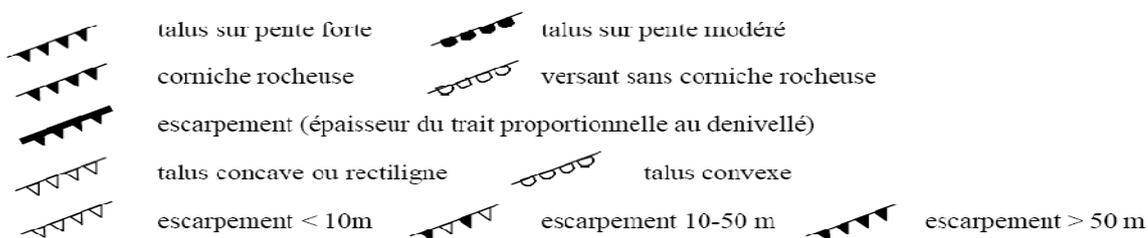


Figure V.13 Les différents figurés [9]

V.6.1.3.2 Sommet

Les courbes de niveau sont concentriques, le point central a une altitude supérieure à celle des courbes qui l’entourent (Fig. V.14).

V.6.1.3.3 Cuvettes

Les courbes de niveau sont aussi concentriques, l’altitude du point central est inférieure à celle des courbes de niveau qui l’entourent, parfois une flèche indique le centre de la dépression (occupée parfois par un lac) (Fig. V.14).

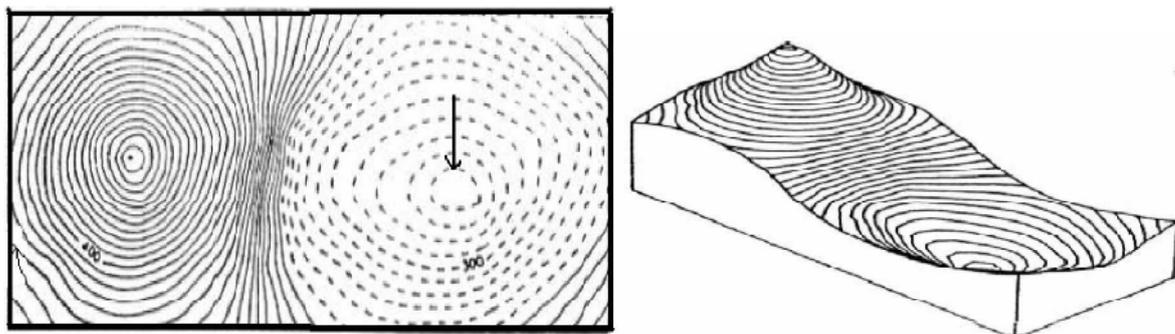


Figure V.14 Sommets et Cuvettes : bloc-diagramme et carte [9]

V.6.2 Formes des vallées

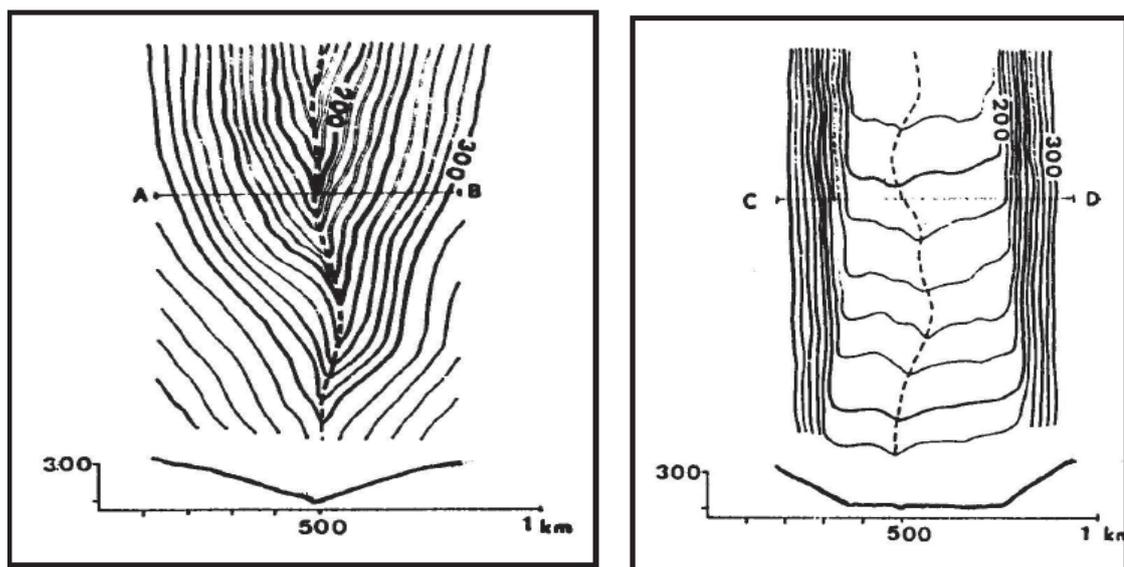
La ligne de thalweg : C'est la ligne joignant les points les plus bas d'une vallée : celle-ci est caractérisée par une forme en V des courbes de niveau, la pointe du V plus ou moins aiguë ou émoussée indique l'amont de la vallée, la courbe enveloppante est à une élévation que la courbe enveloppée (Fig. V.15).

V.6.2.1 Vallée en V

Les courbes de niveau présentent un rebroussement anguleux à la traversée du thalweg (Fig V.15a)

V.6.2.2 Vallée à fond plat ou en U

Le dessin des courbes de niveau rappelle la forme de la vallée, serrée sur les versants, elles sont écartées dans la partie plate (Fig.V.15b).



a) Vallées en V

b) Vallées en U

Figure V.15 Formes des vallées [9]

V.6.3 Le vocabulaire topographique

Le talus : Pente abrupte (raide) reliant deux reliefs à peu près plans d'altitude différente. Un talus raide est souvent appelé escarpement.

La colline : Eminence de forme plus ou moins circulaire à sommet arrondi et à versants en pente douce. Une petite colline isolée est un monticule.

La butte : Eminence à sommet plat et à versants raides, au moins dans le haut.

La cuvette : Dépression fermée, vers le fond de laquelle les pentes convergent de tous côtés.

V.6.4 Les croquis

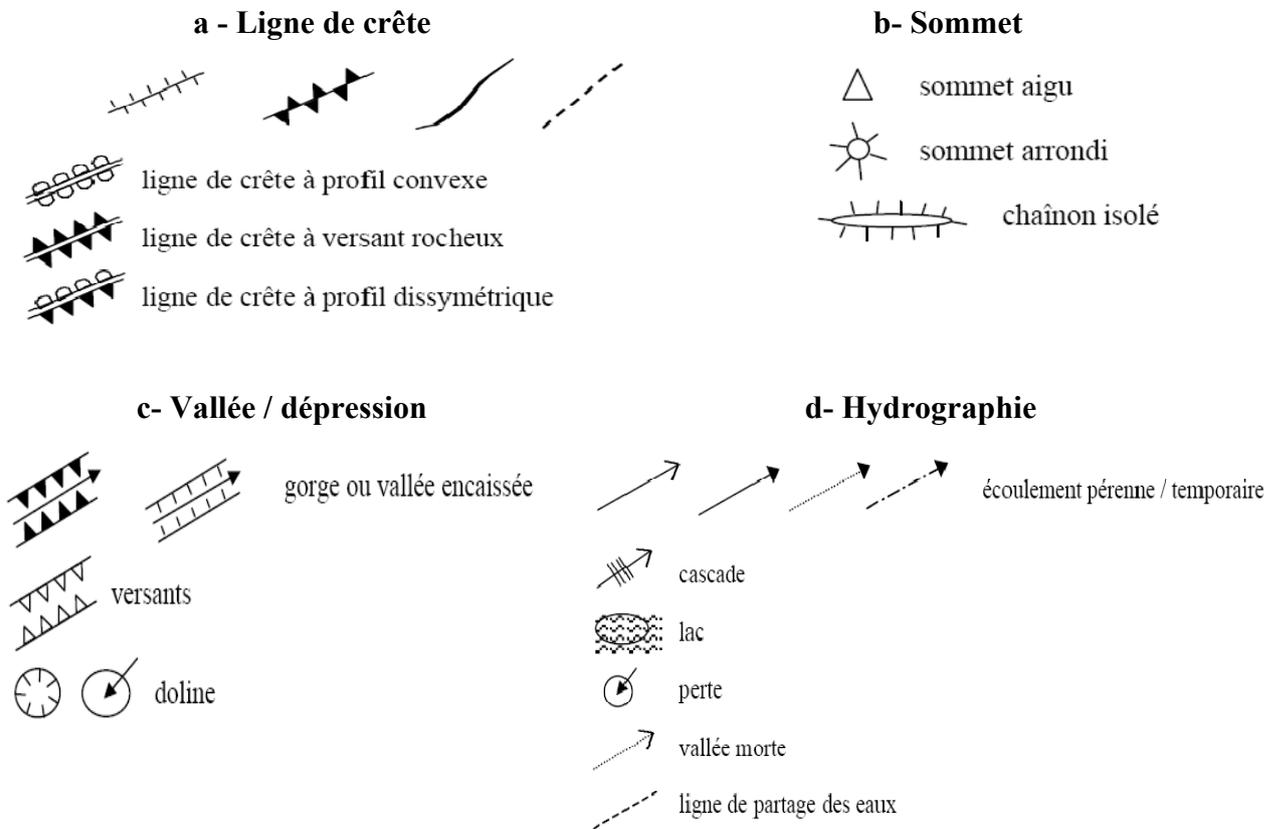


Figure V.16 Les croquis

V.7 La carte géologique

Une carte géologique est, avant tout, une carte topographique à une échelle donnée (1/50 000e), Elle a pour but de représenter sur un fond topographique approprié, la répartition des différentes formations géologiques qui apparaissent sous forme d'affleurements à la surface de la Terre. Une carte géologique fournit des informations sur les couches rocheuses qui se trouvent à la surface de la croûte terrestre. Les formations géologiques sont évaluées en fonction de:

- leur composition (lithologie)
- leur âge (stratigraphie)
- leur position structurale (tectonique)

Les cartes géologiques ont, donc, à préciser:

- d'une part, la nature des formations entrant dans la constitution de l'écorce terrestre au moyen de couleurs et de notations conventionnelles;

- d'autre part, leur disposition respective par l'emploi de signes conventionnels.
- Les formations géologiques du sous-sol représentent les trois catégories de roches : roches sédimentaires, roches magmatiques (plus importantes à la surface de la planète) et roches métamorphiques.

V.7.1 Eléments fondamentaux d'une carte géologique

Lorsqu'un géologue est chargé de cartographier une région, son premier outil est la carte topographique sur laquelle les différents terrains seront représentés par une couleur affectée d'une notation.

Sur une carte géologique, les divers terrains sont désignés par des notations et généralement affectés de couleurs qui indiquent leur âge géologique quand on le connaît.

7.1.1 Couleur

Les différentes couches géologiques sont représentées par des teintes conventionnelles internationales et séparées les unes des autres par des limites fines [38]:

Quaternaire (IV).....	noir ou blanc
Tertiaire (III)	jaune à orange
Crétacé	vert
Secondaire (II) jurassique	bleue
Trias	violet-rose
Primaire (I)	teintes variables sombres
Roches magmatiques	Les teintes vives sont réservées aux

V.7.1.2 Notation

Elle comporte un corps principal et des signes. Le corps principal est une lettre qui rappelle la nomenclature des divisions stratigraphiques :

- Les formations superficielles sont représentées par: E, Fz, a, GI, OE, Loess.
- Les roches sédimentaires: Miocène (M), Oligocène (Ol), Éocène (e), Crétacé (C) en arabe ou en romain (C1, C2, C3.....ou CI, CII, CIII.....), Jurassique (J), Trias (t), etc..

Chaque lettre est accompagnée d'un indice ou d'un exposant, qui permettent de subdiviser les ensembles désignés par les lettres :

- i. *les exposants*, écrits en chiffres arabes, sont employés en ordre croissant lorsqu'on monte dans la série stratigraphique. De bas en haut, on écrit par exemple : c^1 , c^2 , c^3 , etc....
 - ii. *les indices*, écrits en chiffres romains, sont employés en ordre croissant lorsqu'on descend dans la série stratigraphique. De haut en bas, on écrit par exemple : cI, cII, cIII, cIV, cV, etc...
- Les roches magmatiques: on utilise des lettres grecques, en principe proches de l'initiale du nom de la roche. Voici les plus courantes : α andésites, β basaltes, γ granites, μ gneiss,
 - Les roches métamorphiques: ne nous retenons que les notations suivantes : ξ (Ksi) : micaschistes, ζ (dzéta) : gneiss, M : migmatites.
 - Les failles ou contacts anormaux sont représentées par des traits gras pleins quand on peut les observer à l'affleurement; si les failles sont cachées ou supposées, elles sont représentées par des tirés gras [38].

V.7.1.3 Légende géologique

Elle est imprimée en marge de la carte, les différentes couches représentées par leur couleur et la notation correspondante sont disposées sous forme d'un petit rectangle dans l'ordre de superposition normale (de bas en haut, on va de la couche la plus ancienne vers la couche la plus récente) (Fig.V.17). Devant chaque rectangle sont rappelées brièvement [38].

- l'âge
- la nature lithologique
- l'épaisseur quand on la connaît

Les trois catégories de roches sont décrites dans la légende d'une façon indépendante l'une de l'autre. Pour les roches sédimentaires, tous les terrains figurés sur la carte géologique sont classés selon leur âge. Les couches sédimentaires sont disposées les unes au dessus des autres dans leur ordre normal de dépôt ou ordre chronologique : la plus ancienne à la base et la plus récente au sommet.

Chaque subdivision géologique est représentée sur la carte par une couleur et une notation conventionnelle, dont la signification est donnée dans la légende géologique qui figure dans la marge de la carte géologique.



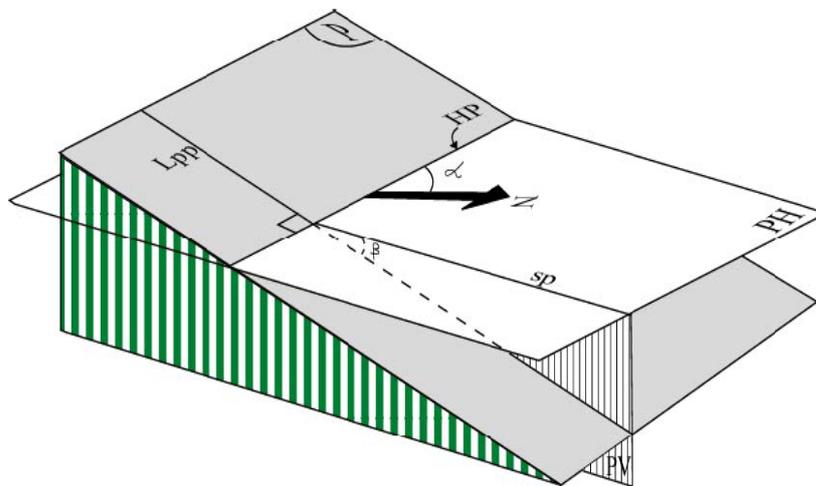
Figure V.17 Exemple de légende [42]

V.7.2 Propriétés géométriques des couches

V.7.2.1 Notion de pendage

La géométrie d'un plan (couche géologique) est déterminée par deux paramètres :

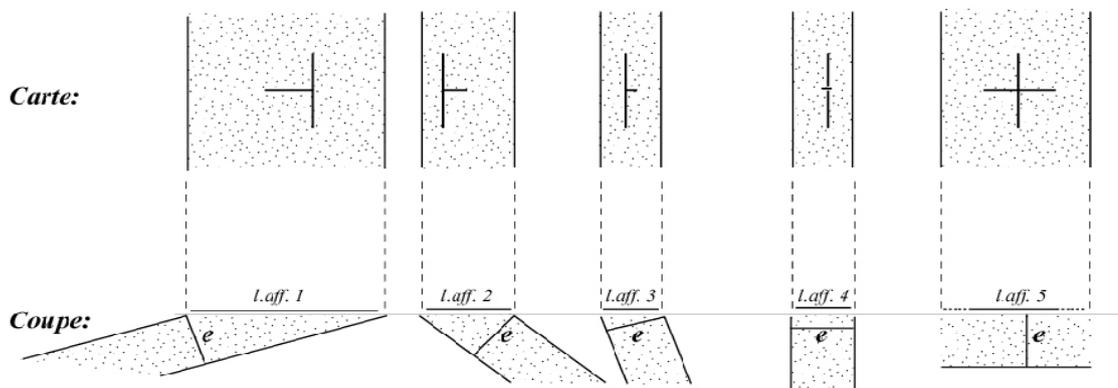
- **Le pendage** : c'est l'angle dièdre d'une couche (ou d'une faille) avec un plan horizontal h . C'est l'angle (β) entre le plan horizontal et la ligne de plus grande pente (L_{pp}) du plan de stratification. La valeur (β) varie de 0° à 90° . Il faut noter que pour une direction donnée, on a deux plans qui présentent la même valeur de pendage mais présentent des sens du pendage (sp) opposés (Fig V.18).
- **La direction** : c'est la valeur angulaire (α) que fait avec le nord, une ligne horizontale tracée dans le plan de stratification de la couche (P). La direction d'un plan se mesure sur le terrain avec la boussole, c'est à dire par rapport au nord magnétique et se reporte sur la carte par rapport au nord géographique. La valeur (α) varie de 0° à 180° .



P: Plan considéré; PH: plan horizontal; PV: plan vertical; HP: horizontale du plan P; N: Nord magnétique; α :direction du plan (P); ϕ : pendage du plan (P); sp: sens du pendage

Figure V.18 Pendage d'une couche [43]

La représentation de la direction et du pendage est un plan représenté sur une carte par des signes conventionnels, généralement en (T) dont la barre horizontale est parallèle à l'horizontale du plan et la barre verticale à sa ligne de plus grande pente. La longueur de cette dernière est inversement proportionnelle à la valeur du pendage. Parfois le signe reste le même, mais on note, à côté de lui, la valeur du pendage en degrés (Fig .V.19).



e: épaisseur de la couche; L.aff: sa largeur d'affleurement

Figure V.19 Représentation des directions et pendages sur une carte et en coupe géologique [38]

V.7.3 Coupe géologique

C'est la représentation du sous-sol sur une carte topographique (sans couverture végétale), réalisée à partir d'affleurements et de forages. Une coupe géologique est une représentation, selon une section verticale, des terrains cachés en profondeur en n'en connaissant que la partie qui affleure.

Les couches géologiques se présenteront de plusieurs manières sur le terrain. On distingue :

- ◆ La structure horizontale (tabulaire) ; Dans le cas d'une structure tabulaire, les couches sont horizontales ou sub-horizontales, 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.
- ◆ Cas d'un plateau par exemple, seule la couche la plus jeune affleure, et donc la seule représentée sur la carte géologique (Fig. V.20A). 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 (Fig. V.20B).

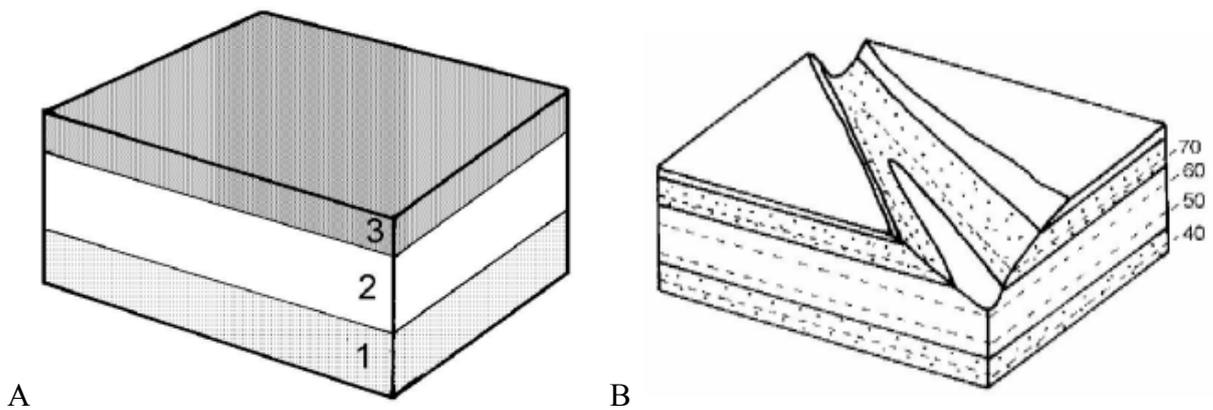


Figure V.20 Structures tabulaires A) relief plat B) Vallée [38]

- ◆ la structure plissée : Les plis sont des déformations des couches sédimentaires sous forme d'ondulations on distingue [37].
 - ✓ Les plis Anticlinaux : la courbure des couches est dirigée vers le haut.
 - ✓ Les plis synclinaux : la courbure des couches est dirigée vers le bas.

On peut reconnaître le type de plis gras à l'âge des couches, le cœur du pli anticlinal contient la couche la plus ancienne, alors que le cœur du pli synclinal contient la couche la plus récente. (Fig. V.21)

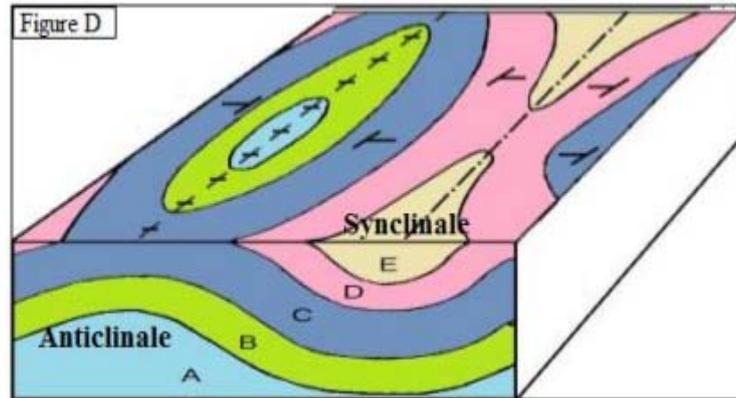


Figure V.21 Structures plissées [37]

- ◆ la structure faillée : Une faille est une cassure des roches accompagnée d'un déplacement relatif des deux compartiments résultant de cette cassure. Sur une carte géologique les failles sont représentées par un trait plus fort que celui des limites de couches. On distingue trois types de failles (Fig. V.22).

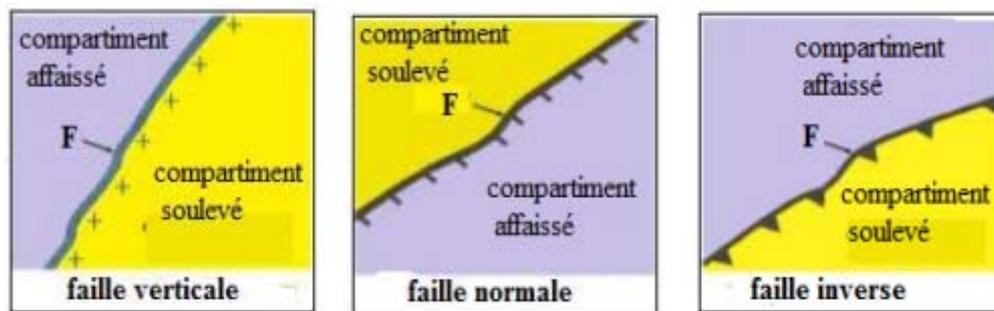


Figure V.22 Structure faillée [37]

V.7.3.1 Principe de construction d'une coupe géologique

Après avoir réalisé le profil topographique, en respectant les échelles de longueur et de hauteur:

- Sur le bord supérieur du papier millimétré, entre les deux extrémités du trait de coupe orientée, relever les limites des contours géologiques et l'âge de chaque strate ou couche.
- Les projeter sur la surface topographique.
- Mettre en place les strates selon les principes de superposition tout en considérant les pendages des couches

Deux règles fondamentales sont toutefois à respecter :

- Il faut commencer par dessiner la couche la plus récente dont on connaît le toit partout où elle affleure, puisque les autres couches doivent se mouler sur elle.

- Appliquer les valeurs de pentages déduites de la carte et donner aux couches les épaisseurs indiquées sur la légende et les maintenir constantes, sauf indication contraire, tout le long de la coupe.

V.7.3.2 Représentation des figurés

Si, sur une carte géologique, les formations géologiques se distinguent par une couleur et une notation, dans une coupe géologique on leur affecte un figuré. Sur la figure V.23, sont représentés quelques-uns des figurés les plus utilisés.

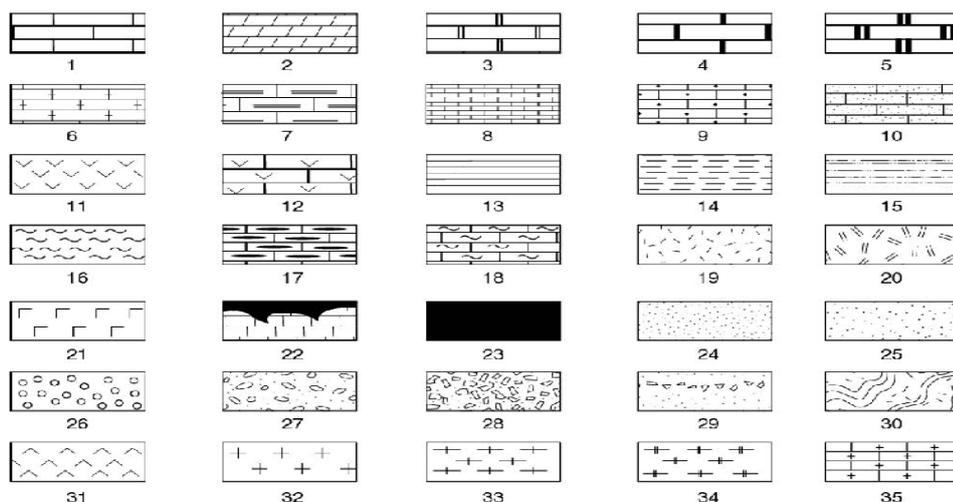
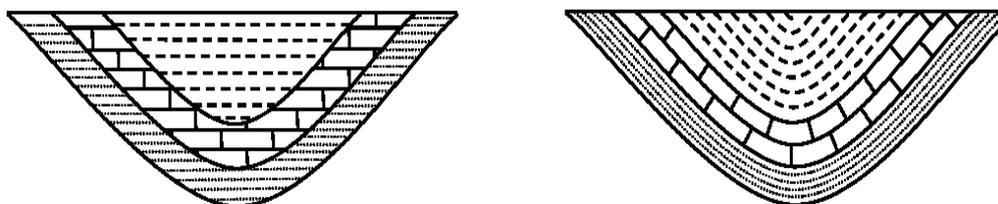


Figure V.23 Quelques figurés [43]

- 1 à 10 : calcaires (1 à 5, en bancs ; 6 : marneux ; 7 : à silex ; 8 : en plaquettes ; 9 : conglomératiques ; 10 : gréseux) ; 11 et 12 : dolomies et calcaires dolomitiques ;
- 13 à 18 : argiles et marnes (15 : sableuses ; 17, 18 : marno-calcaires) ; 19 et 20 : roches massives ; 21 : roches salines ; 22 : dépôts en poches ; 23 : couche de faible épaisseur ou épaisseur variable ;
- 24 à 29 : roches détritiques (24 : sables ; 25 : grès ; 26 et 27 : conglomérats ; 28 et 29 : brèches ; 30 : socle plissé ;
- 31 : roche éruptives basiques ; 32 : roches intrusives acides ;
- 33 à 35 : roches métamorphiques (33 et 34 : schistes cristallins ; 35 : calcaires métamorphiques).

Le dessin des figurés doit être réaliser soigneusement, en rapport avec les limites des couches, parallèlement ou perpendiculairement (Fig. V.24 B) et non par rapport à l'horizontale de la coupe (Fig. V.23 A). [43]



A : représentation incorrecte. B : présentation des figurés correcte ;

Figure. V.24 Le dessin des figurés [43]

V.7.3.3 Détermination du pendage des couches géologiques

Lorsque le pendage n'est pas indiqué sur la carte, on peut le déterminer grâce à deux méthodes: la méthode des trois points et la méthode du cercle

V.7.3.3.1 La méthode des trois points

a) Aux intersections des couches avec une colline, on a les deux cas suivants :

1^{er} cas : couche oblique au niveau d'une colline

- prendre trois points non alignés tels que 2 d'entre eux aient la même altitude (B et C) et le 3^{ème} à une altitude différente (A) à la pointe de l'ondulation dessinée par la limite de la couche: les trois points définissent un plan dont le pendage est celui de la couche;
- tous les points de la droite BC sont à la même altitude (500m). Le point D (intersection de BC et de XY) est donc aussi à l'altitude 500m;
- il suffit alors de projeter le point D sur la coupe (et non sur le profil), à l'altitude 500m, on obtient le point D';
- puis on joint les points A' et D' pour obtenir le pendage de la couche (Fig. V.25).

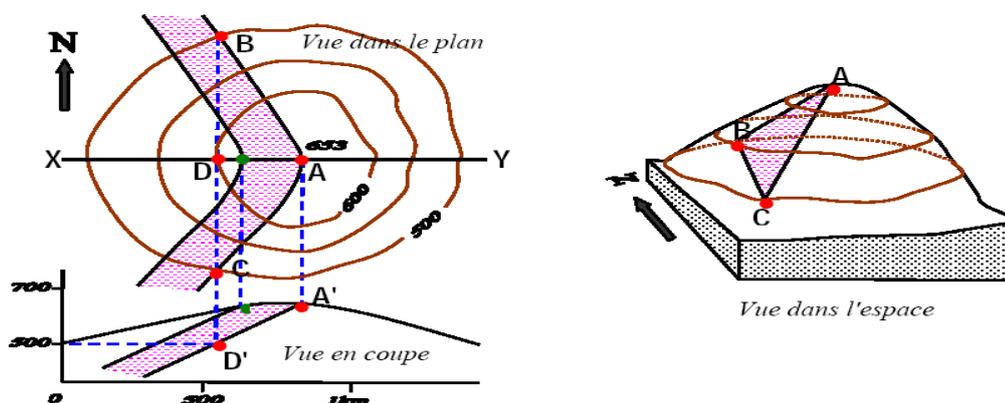


Figure. V.25 Intersection d'une couche oblique au niveau d'une colline [43]

2^{ème} cas (Fig. V.26) : Le tracé des couches verticales sur une carte rectiligne au niveau des vallées et des collines.

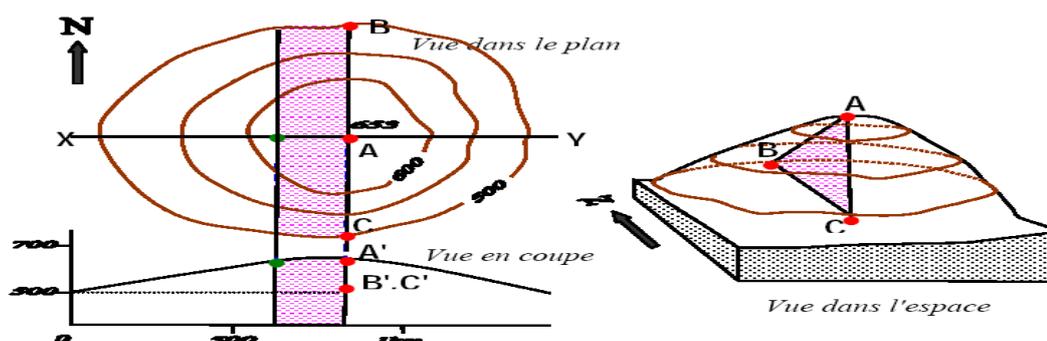


Figure. V.26 Intersection d'une couche verticale au niveau d'une colline [43]

b) À l'intersection d'une couche et d'une vallée, on a les deux cas suivants :

1^{er} cas (Fig. V.27): L'intersection d'une couche oblique avec une vallée est en forme de V; la pointe du V est dirigée vers l'Est et elle indique le sens du pendage (vers l'Est).

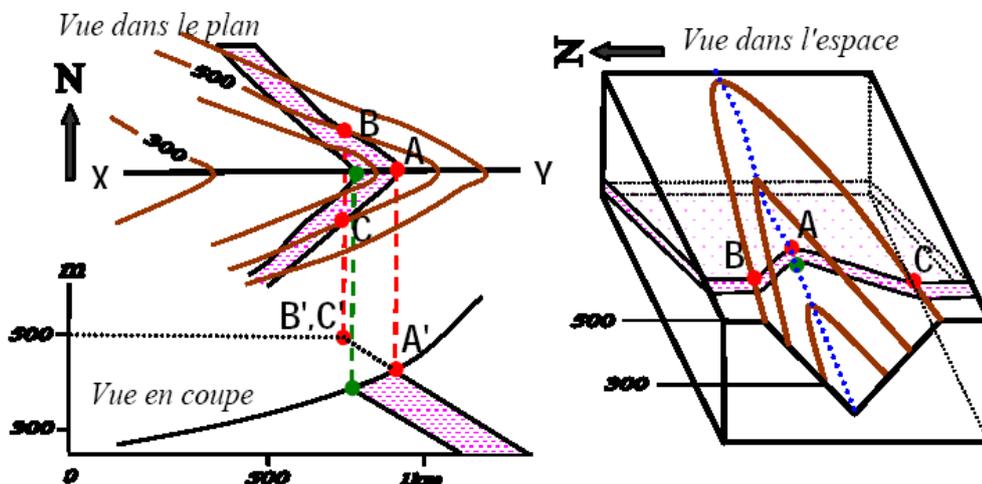


Figure. V.27 Intersection d'une couche oblique avec une vallée en forme de V

2^{ème} cas (Fig. V.28): La couche oblique, la forme V de la couche et de la vallée sont de sens contraire. La pointe du V de la couche est dirigée vers l'Ouest et indique ainsi un pendage vers l'Ouest.

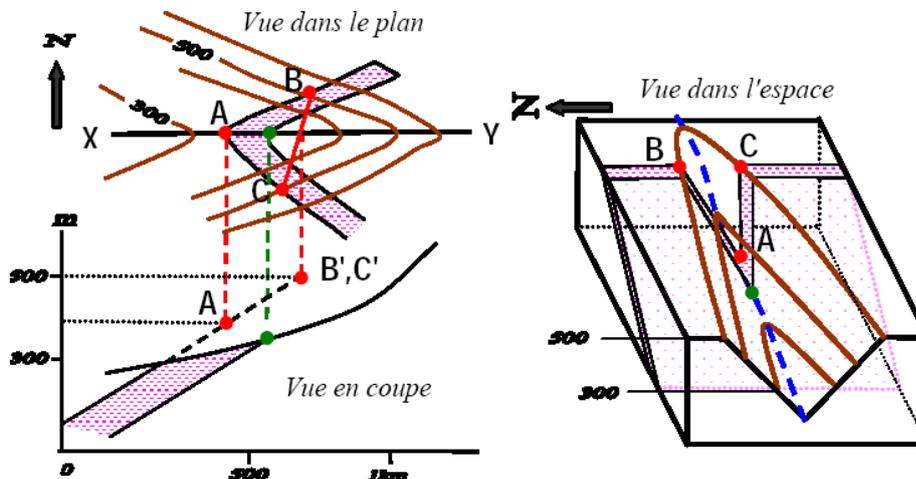


Figure. V.28 Intersection d'une couche oblique avec une vallée en forme de V sont de sens contraire

3^{ème} cas (Fig. V.29): Dans le cas de couches horizontales, le tracé est parallèle aux courbes de niveau.

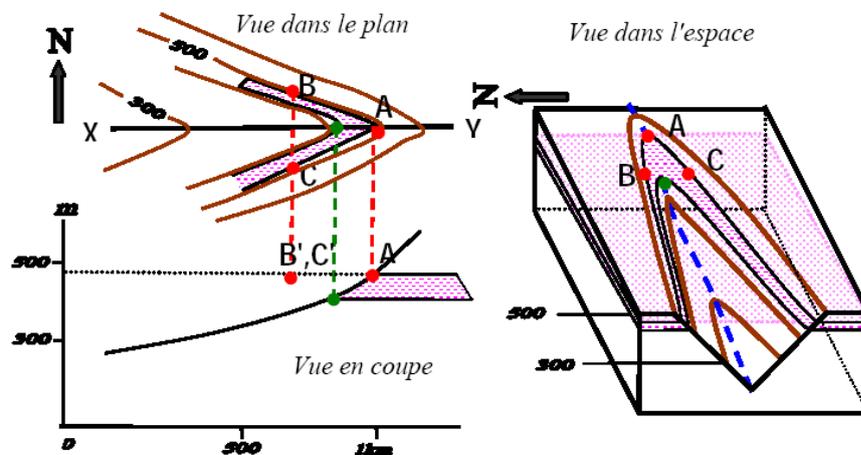


Figure. V.29 Intersection d'une couche horizontale avec une vallée en forme de V

V.8. La projection stéréographique

V.8.1 Introduction

La projection stéréographique est la projection polaire d'une sphère sur un plan équatorial ; elle est utilisée en cristallographie (projection des plans de clivages, ou de macles, des axes et des plans des cristaux...), et en tectonique (projection des plans de stratifications ou de schistosités, des axes des plis, des stries...).

La projection stéréographique, en géométrie et en cartographie, est une projection cartographique azimutale permettant de représenter une sphère privée d'un point sur un plan. On convient souvent que le point dont on prive la sphère sera un des pôles de celle-ci ; le plan de projection peut être celui qui sépare les deux hémisphères, nord et sud, de la sphère, qu'on appelle plan équatorial. [39]

La projection stéréographique est employée, afin de réduire l'espace tridimensionnel à un espace plan plus aisément maniable, et d'avoir ainsi une représentation plane de la sphère, on projette cette sphère sur un plan qui est, pour le système employé en géologie, le plan équatorial de la sphère.

V.8.2 Principe et propriétés

La projection stéréographique peut s'effectuer sur un plan quelconque. Par convention en cristallographie, ce plan passe par le centre O de la sphère : il s'agit d'un plan équatorial.

La projection stéréographique est une projection centrale. On choisit un point S de la sphère comme centre de projection, tel que la droite OS est perpendiculaire au plan équatorial. Le point S est appelé « pôle sud » de la sphère et le point N qui lui est diamétralement opposé « pôle nord ». Un autre point z de la sphère est projeté vers son image z' sur le plan, définie comme le point d'intersection de la droite Sz avec le plan. Dans la figure V.30, le point H₁ est projeté vers son image H'₁ et le point H₂ vers son image H'₂.

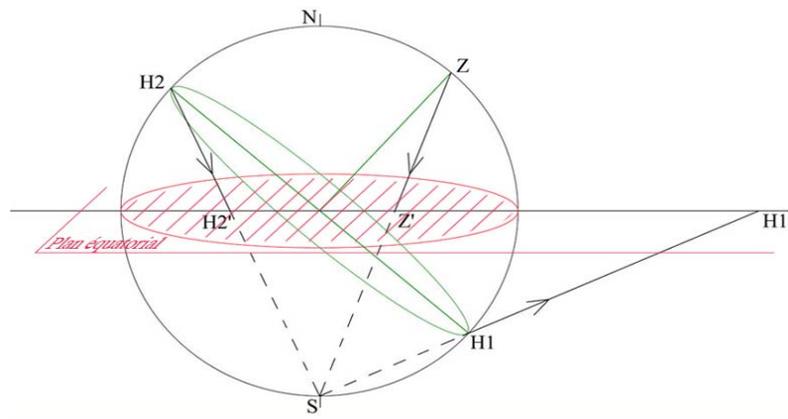


Figure. V.30 Projection stéréographique sur le plan équatorial. [39]

La projection stéréographique ainsi définie est quasiment une bijection : à tout point de la sphère privée du point S correspond un unique point du plan et inversement. D'après la méthode de construction donnée, on remarque que :

- les points fixes de la projection stéréographique sont les points de l'intersection de la sphère avec le plan, qui forment le « grand cercle équatorial » de la sphère ;
- tout point de l'hémisphère nord, comme H₂, est projeté à l'intérieur du disque équatorial, délimité par le grand cercle équatorial ;
- tout point de l'hémisphère sud, comme H₁, est projeté sur le reste du plan à l'extérieur du disque équatorial.

Une propriété importante de la projection stéréographique est qu'elle conserve les angles : l'angle H₁OH₂ entre deux points H₁ et H₂ de la sphère est le même que l'angle H'₁OH'₂ entre leurs images, où O est le centre de la sphère. D'autre part, l'image d'un cercle quelconque sur la sphère est un cercle dans le plan équatorial (Fig. V.30 ; un grand cercle passant par les deux pôles, et donc perpendiculaire au plan de projection, a pour image une droite (infinie) dans le plan équatorial.

V.8.3 Définition d'un canevas

Un canevas est un diagramme correspondant à une transformation géométrique déterminée, et servant de repère pour la représentation d'éléments géométriques (plans et lignes).

Il existe deux types suivant le mode de projection adopté (Fig. V.31) :

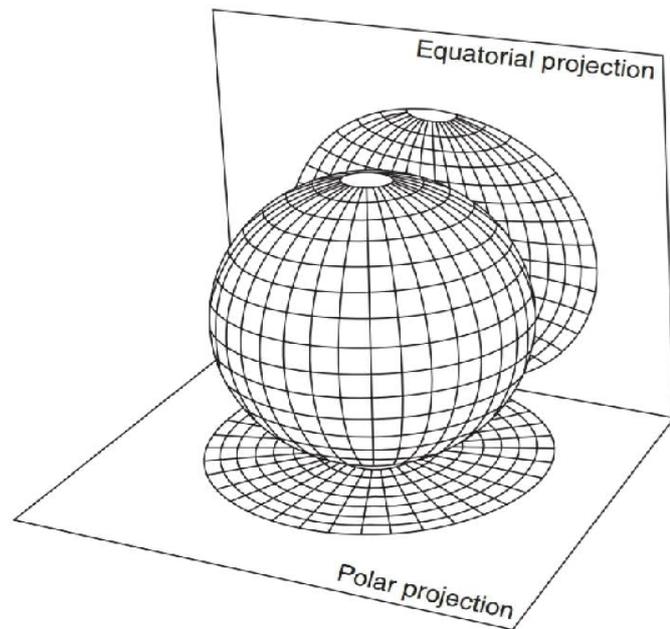


Figure V.31 Projections polaires et équatoriales d'une sphère.

- **Le réseau stéréographique ou canevas de Wulff**: il conserve les angles mais pas les surfaces; Le canevas de Wulff est utilisé pour la projection stéréographique en cristallographie. Il permet de marquer la position angulaire d'un point de façon précise ou de lire les angles entre deux points. Le canevas de Wulff représente la projection stéréographique de la sphère sur son disque équatorial ainsi que celle de ses méridiennes et parallèles. L'axe nord-sud de la sphère est perpendiculaire au plan du dessin, avec le pôle nord au-dessus de l'abaque et le pôle sud en dessous. L'origine des angles est choisie sur le centre O de la sphère, soit au centre du disque équatorial [40].

Le canevas de Wulff peut être gradué par pas de 10° , comme dans la figure ci-contre, ou par pas plus petits, par exemple 5° ou 2° . La graduation choisie est la même entre méridiens et entre parallèles. Dans le langage cristallographique, les méridiens sont appelés « grands cercles » et les parallèles « petits cercles ». Les petits cercles sont perpendiculaires aux grands cercles sur la sphère de projection (Fig. V.32).

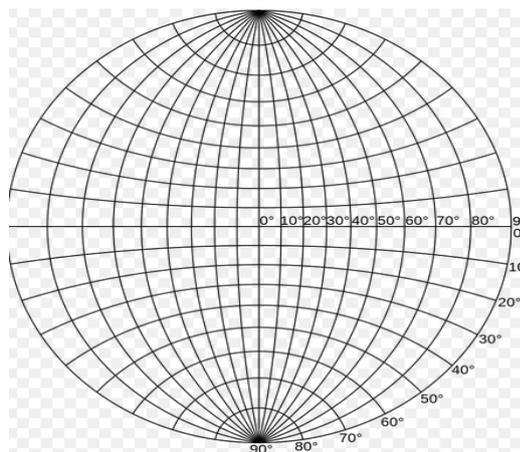


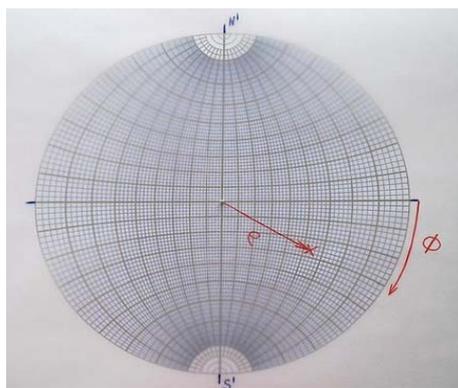
Figure. V.32 Abaque de Wulff : pas de 10° entre méridiens et entre parallèles [39]

- **Le réseau Lambert ou canevas de Schmidt (équatorial)**: les surfaces égales sur la sphère, le demeurent à peu près sur la projection. Le réseau équatorial peut être utilisé pour tracer à la fois les plans et les pôles. Dans le cas de la projection équatoriale. Sur ce réseau, toute zone de la surface de la sphère de référence est projetée comme une zone égale sur le stéréonet. Cette propriété du filet est utilisée dans le contour des tracés de pôles pour trouver des concentrations de pôles qui représentent des orientations préférées, ou des ensembles de discontinuités.

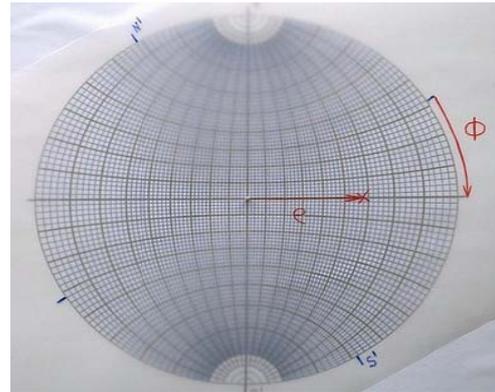
V.8.4 Lecture des coordonnées angulaires d'un point

Le rayon de la sphère de projection étant quelconque, les coordonnées d'un point dans la projection stéréographique ne sont données que par deux angles Φ et ρ . Les angles sont lus sur l'abaque à l'aide des grands cercles uniquement (Fig. V.33) [40].

L'angle Φ d'un point représente sa latitude et est lu en premier : c'est l'angle de la rotation autour de l'axe nord-sud qu'il faut appliquer au point dans le sens trigonométrique pour l'amener sur le segment de droite du grand cercle horizontal des longitudes. Cette rotation est nécessaire pour pouvoir lire ensuite plus facilement la longitude ρ du point le long du grand cercle des longitudes. La latitude Φ est comprise entre -180° et 180° et la longitude ρ entre 0 et 180° . Les points S' et N' ont donc pour coordonnées (Φ, ρ) respectives $(90^\circ, 90^\circ)$ et $(-90^\circ, 90^\circ)$ [40].



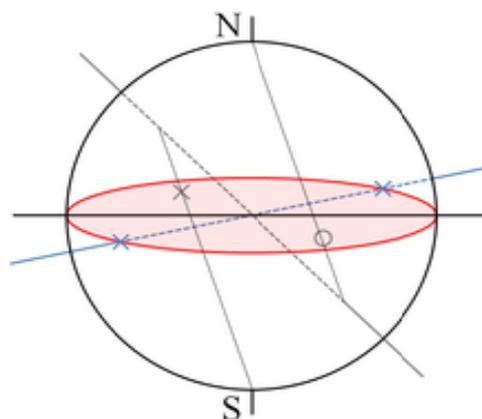
a) Position initiale du point.

b) Lecture des coordonnées après rotation du calque : $\Phi=32^\circ$, $\rho=58^\circ$.**Figure. V.33** Lecture des coordonnées angulaires d'un point [40]

V.8.5 Projection d'éléments de symétrie

Les éléments de symétrie que l'on peut rencontrer pour la projection stéréographique sont des points, des droites et des plans, qui ont tous au moins un point en commun que l'on choisit comme origine de la sphère de projection. Pour représenter ces éléments, on effectue la projection de leurs intersections avec la sphère. On parle de projection stéréographique de droites et de plans pour simplifier.

V.8.5.1 Projection d'une droite

**Figure. V.34** Projection de droites [40].

Une droite passant par le centre de la sphère de projection intersecte celle-ci en deux points diamétralement opposés. La projection stéréographique d'une telle droite est donc représentée par deux points opposés dans le disque équatorial. Si la droite est parallèle au plan équatorial, les deux points d'intersection sont représentés par une croix sur le grand cercle équatorial, sinon, ils sont représentés par une croix et par un rond à l'intérieur du disque équatorial, car un des points

d'intersection appartient à l'hémisphère nord et l'autre à l'hémisphère sud. Les deux points projetés sont symétriques par rapport au centre du disque équatorial (Fig. V.34).

V. 8.5.2 Projection d'un plan

Un plan passant par le centre de la sphère de projection intersecte celle-ci en un cercle de même diamètre que la sphère. La projection stéréographique d'un tel plan est donc un grand cercle. La projection d'un plan perpendiculaire au plan équatorial est un segment de longueur égale au diamètre de la sphère.

Dans l'exemple de droite ci-dessous, la moitié du grand cercle provenant de la projection des points de l'hémisphère sud de la sphère est représentée en pointillés (Fig. V.36). [40]

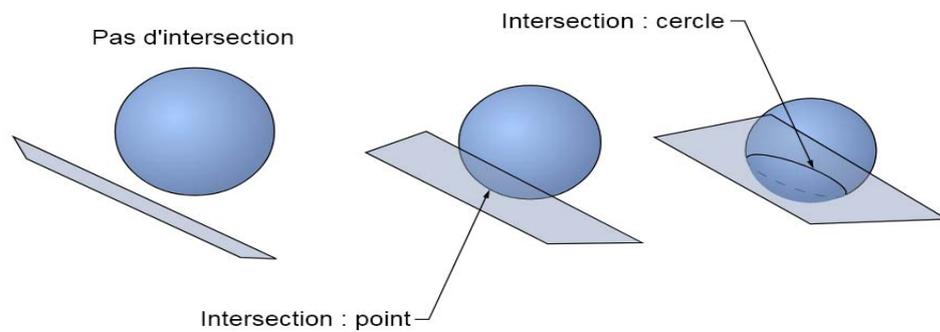


Figure. V.35 Intersection d'un plan quelconque avec une sphère [40]

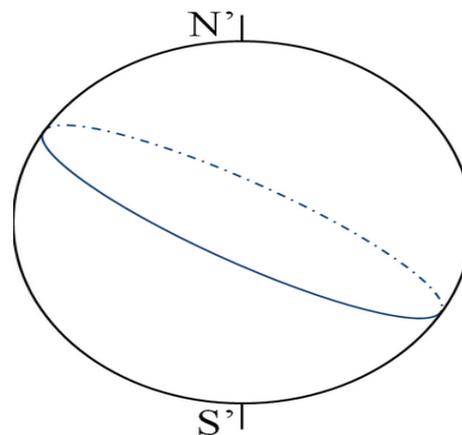


Figure. V.36 Projection d'un plan passant par l'origine. [40]

V.9 Conclusion

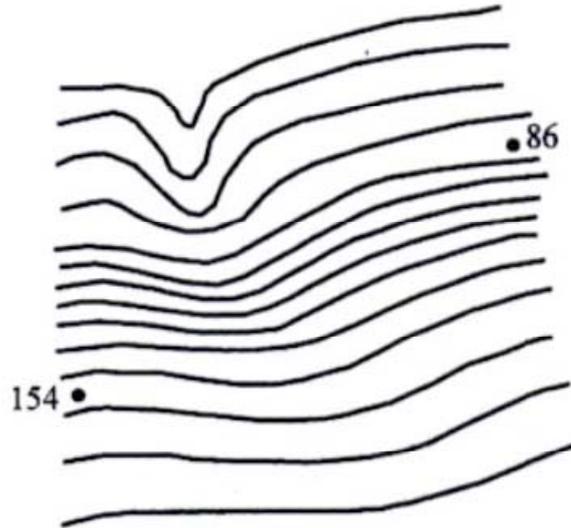
La cartographie est l'art, la technique et la science de l'élaboration des cartes. Elle permet la représentation géographique des éléments naturels et artificiels d'un territoire, tels qu'une route,

une rivière, un lac, dans un système de coordonnées terrestres. Dans ce chapitre, on a présenté les propriétés des cartes topographiques qui présentent les relations spatiales existant entre différents objets géographiques, comme les bâtiments, les routes, les frontières et les cours d'eau. On a présenté également les caractéristiques d'une carte géologique qui représente des roches et structures géologiques d'une région. Son objectif est de présenter la répartition spatiale des faciès lithologiques, leur succession, ainsi que les diverses structures d'ordre tectonique. Sur une carte géologique, les formations géologiques se distinguent par une couleur et une notation, dans une coupe géologique on leur affecte un figuré. Le principe et les propriétés de la projection stéréographique ont été traités. À la fin de ce chapitre, une série d'exercices d'application avec leurs solutions a été présentée

V.10 Exercices d'application

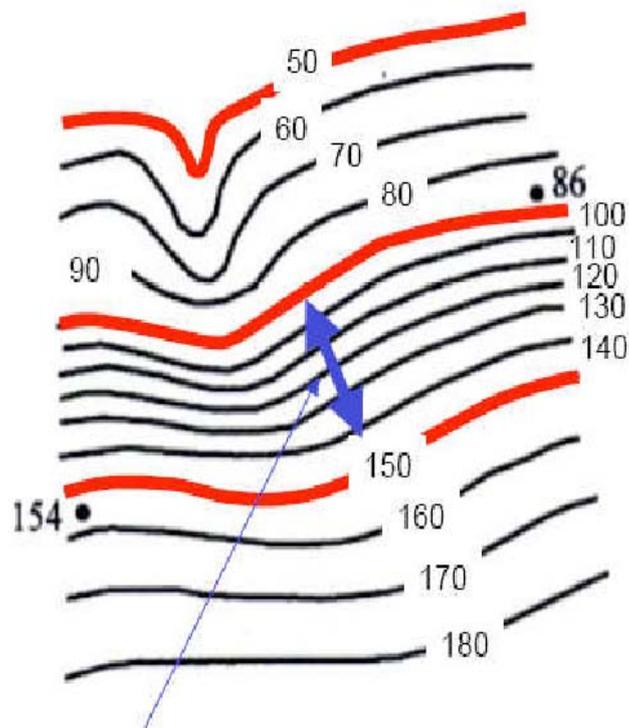
Exercice 01

On a reporté deux points cotés sur la carte. Indiquer l'altitude des courbes, renforcer les courbes maîtresses, calculer l'équidistance. La pente est-elle constante ?



Solution

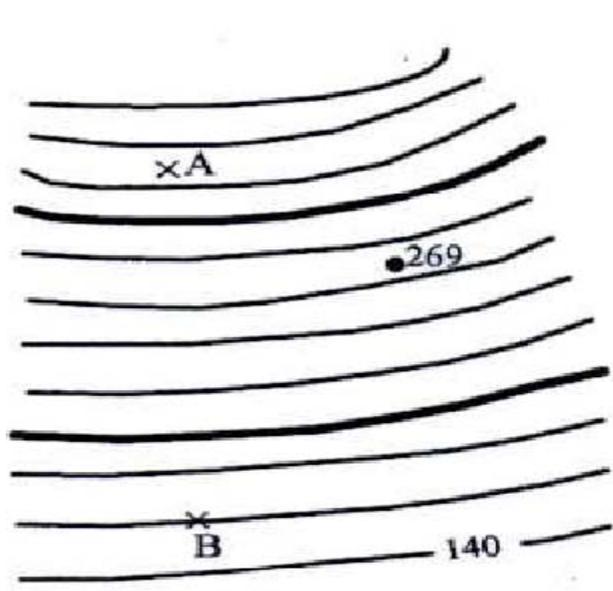
- L'équidistance = 10 m
- Pente : non constante \Rightarrow l'écartement en carte est variable



Secteur à pente plus forte (courbes + serrées)

Exercice 02

Trouver la pente entre les 02 point A et B

**Solution**

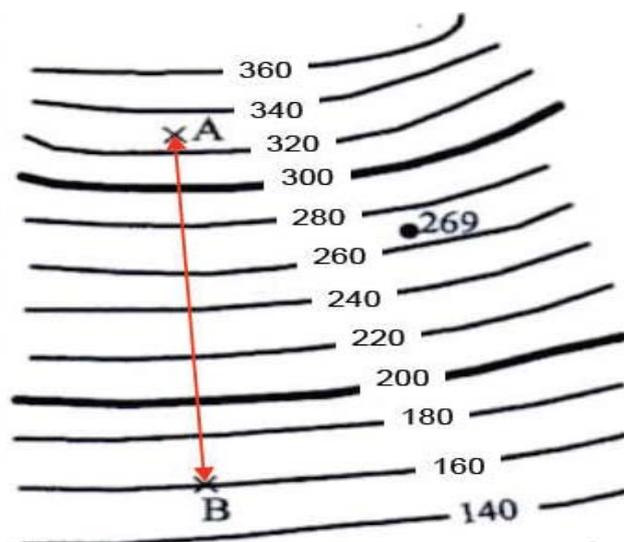
Equidistance = 20 m

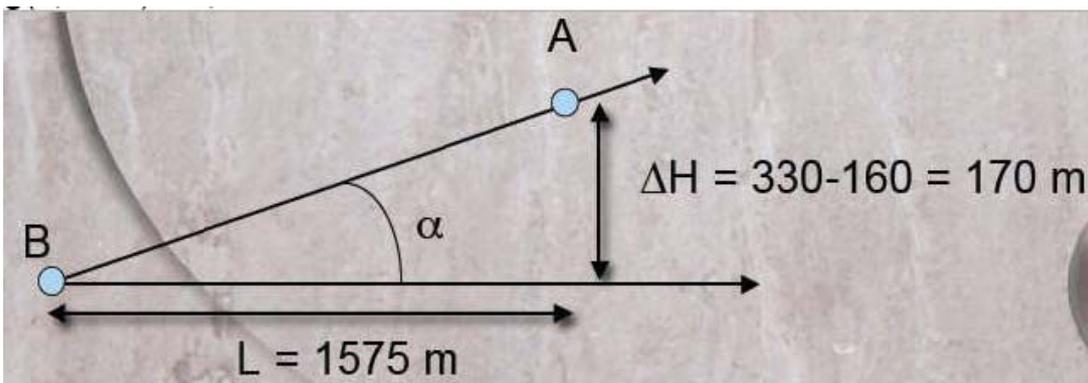
- ◆ Altitude de A = 330 m
- ◆ Distance A-B = 3,15 cm

sachant que :

1 cm \leftrightarrow 50000 cm = 500 m

3,15 cm \leftrightarrow 3,15*500 = 1575 m



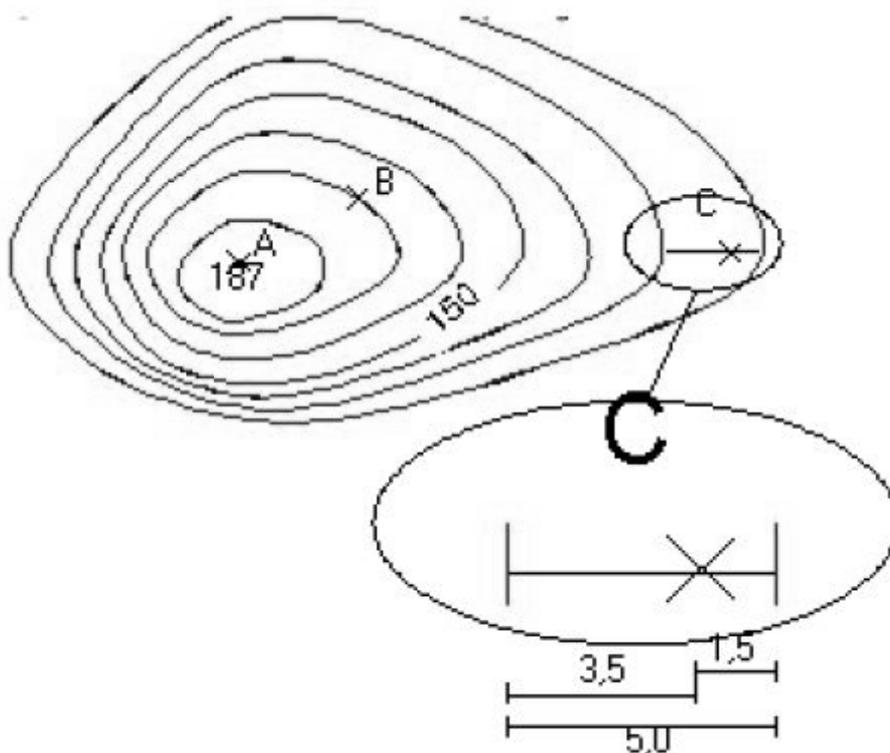


$$\text{tg}(\alpha) = \Delta H/L = 170/1575 = 0,1079$$

♦ soit $\alpha = \text{arctg}(0,1079) = 6,16^\circ$

Exercice 03

Calculer l'altitude du point C sur la carte topographique ci contre



Solution

Pour calculer l'altitude d'un point, il faut d'abord étudier les courbes de niveau et les points côtés.

Trois points A, B et C ont été indiqués sur le schéma suivant :

Le point A est sur un point coté : son altitude est de 187 m

Le point B est sur une courbe de niveau : son altitude est de 170 m

Le point C... c'est plus compliqué .

Comme C est situé entre deux courbes de niveau, il faut commencer par dessiner la ligne la plus courte entre les deux courbes et passant par le point C : c'est la ligne de plus grande pente.

Ensuite, il faut mesurer la longueur de cette ligne. Ici 5 mm.

Puis il faut mesurer la distance entre la courbe la plus basse (ici 120 m) et le point : on trouve 1,5 mm dans l'exemple.

Enfin, une règle de trois permet de calculer le dénivelé : dans l'exemple si 5 mm représentent une élévation de 10 m (la différence d'altitude entre deux courbes, c'est à dire l'équidistance), alors 1,5mm correspondront à $1,5 \times 10 / 5 = 3$ m.

L'altitude du point est donc de $120 \text{ m} + 3 \text{ m} = 123 \text{ m}$.

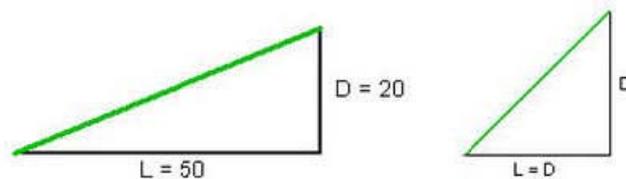
- ◆ Calculer le pourcentage d'une pente

Pour calculer la pente d'un trajet, il suffit d'appliquer la formule suivante :

$$\text{Pente (\%)} = \frac{\text{Dénivelé (m)} \times 100}{\text{Longueur parcourue (m)}}$$

$$\text{Pente (\%)} = (20 \times 100) / 50$$

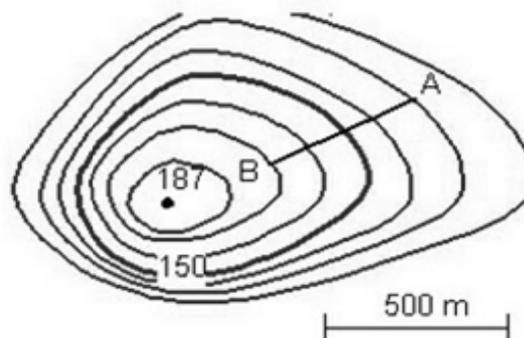
$$\text{Pente} = 40\%$$



Donc une pente est égale à 100% lorsque le dénivelé est égal à la longueur parcourue :

Exercice 04

Calculer la pente du trajet A B



Solution

Comprendre : si je fais 100 m en longueur, je monte de 40 m.

En allant de A vers B, je passe de la courbe 130 à la courbe 170 : j'ai donc monté 40 m
 La longueur du trajet à vol d'oiseau est de 450 m
 Donc la pente est :

$$P = (40 \times 100) / 450$$

$$P = 8,9 \%$$

En allant de A vers B, je monte : la pente est de + 8,9 %

En allant de B vers A, je descends : la pente est de - 8,9 %

Exercice 5

Sur une carte, l'observation de courbes de niveau concentriques peut indiquer deux caractéristiques topographiques différentes, lesquelles ?

L'analyse précise des courbes de niveau et la recherche de points cotés permet de choisir la bonne hypothèse.

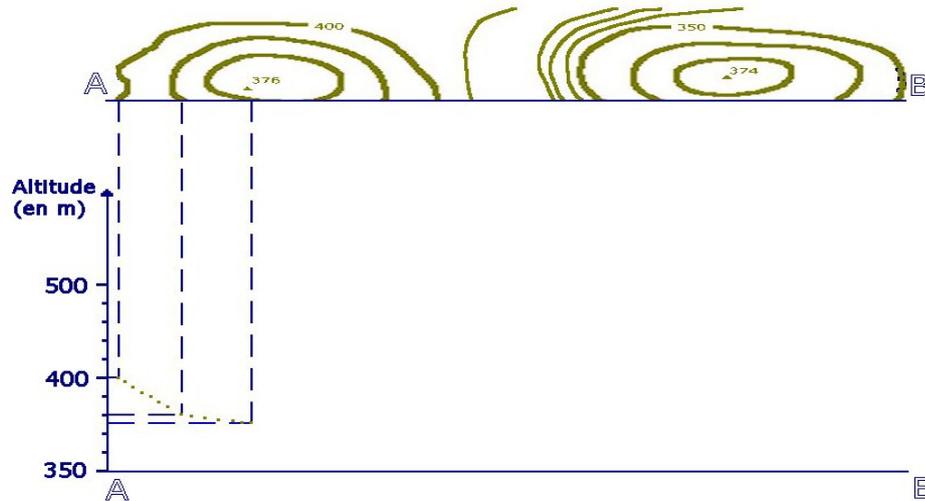


Solution

Réaliser une coupe, c'est transposer les valeurs d'altitude sur un croquis représentant une tranche de terrain. Pour construire une coupe topographique :

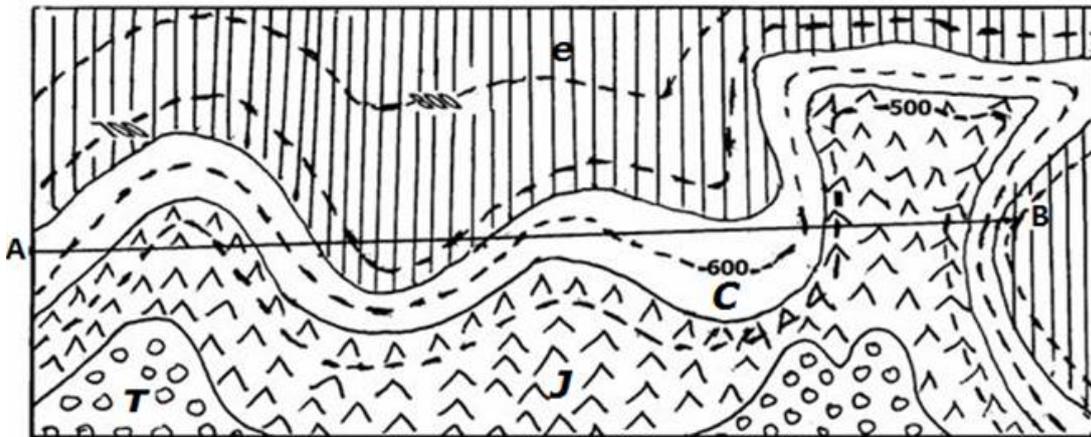
- Tracer une ligne dite trait de coupe.
- Sur une feuille millimétrée, après avoir tracé deux axes comme sur le schéma ci-dessous, indiquer les altitudes en commençant par le point le plus bas. Conserver l'échelle horizontale de la carte
- Placer la bordure de la feuille millimétrée le long du trait de coupe, noter les points de départ et d'arrivée (A-B) ainsi que toutes les courbes de niveau et les points cotés qui coupent ce trait.
- Projeter ces altitudes sur votre croquis en respectant l'échelle verticale.
- Raccorder à la main les points entre eux afin d'obtenir le profil topographique
- Orientation du profil : pour l'orientation du profil se reporter à la rose des vents ; il faut la dessiner sur un papier transparent, cette rose doit être placée au centre de la coupe de façon que la direction NS soit parallèle au méridien le plus proche du trait de coupe.

Lorsque le profil est terminé, mettre un titre, et placer quelques repères géographiques. Sachant que sur la carte l'équidistance est de 10 m, poursuivre le profil topographique



Exercice 6

Soit la carte géologique ci-dessous



J = 150 m ; T = 200 m

Echelle : 1/10.000^{ème}

1. Calculer la distance réelle AB.
2. Classer par ordre chronologique de dépôt les différentes couches observées sur la carte. A quelles ères ces couches appartiennent-elles ?
3. Quelle est la structure observée sur la carte ? Justifier.
4. Réaliser le profil topographique et la coupe géologique suivant le trait AB.

Solution

1. distance réelle de AB

AB carte = 16 cm

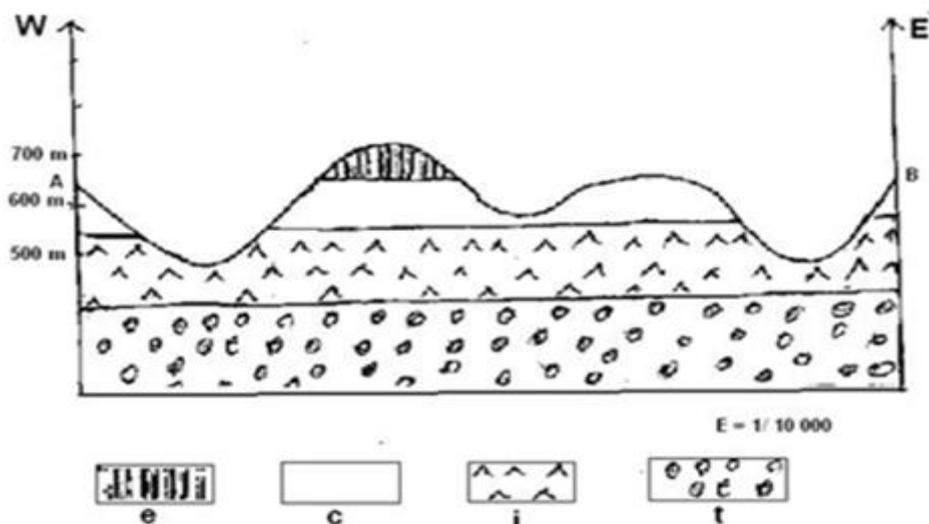
AB réel = 16 x 10000 = 160000 cm = 1600 m

2. Ordre chronologique des différentes couches : e c j t

e de l'ère III, t j et c de l'ère II

3. On a une structure horizontale ou tabulaire car les limites des couches et les courbes de niveau sont parallèles

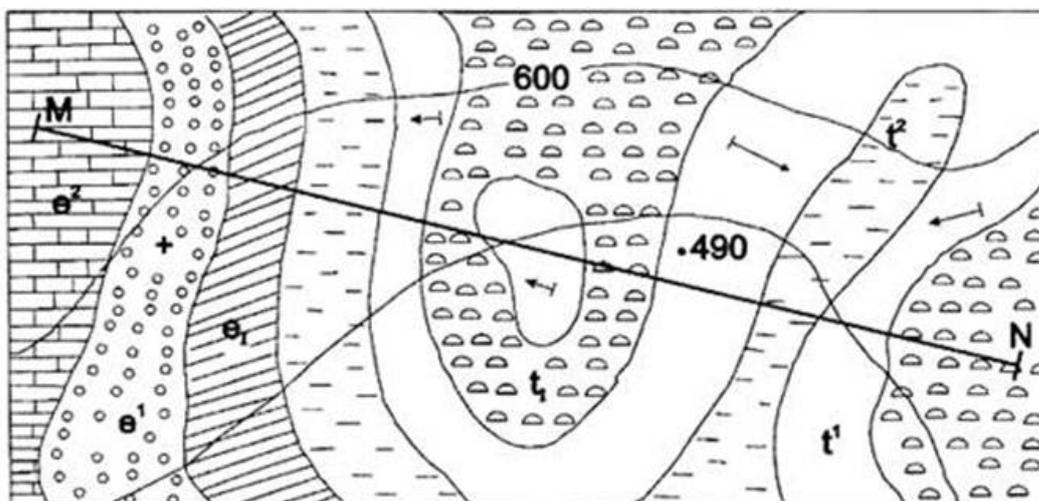
4. Profil topographique et coupe géologique



Exercice 7

Soit la carte géologique ci dessous.

- 1° Calculer l'échelle de cette carte si la distance réelle entre M et N est égale à 8,5 km
- 2° Etablir l'ordre chronologique des couches. Quelle est l'importance de ce classement ?
- 3° Déterminer la structure géologique de cette carte. Justifier votre réponse
- 4° Réaliser le profil et la coupe géologique correspondants suivant le trait de coupe MN.



Solution

1. L'échelle de cette carte si la distance réelle M et N est égale à 8,5 km ; MN sur la carte étant 7 cm :

$$E = 1/L = 1/x \Rightarrow x = L/e = 8500/7 = 1214,2857$$

$$E = 1/1214,2857$$

2. L'ordre chronologique des différentes couches : e^2 ; e^1 ; e_1 , t^2 ; t_1

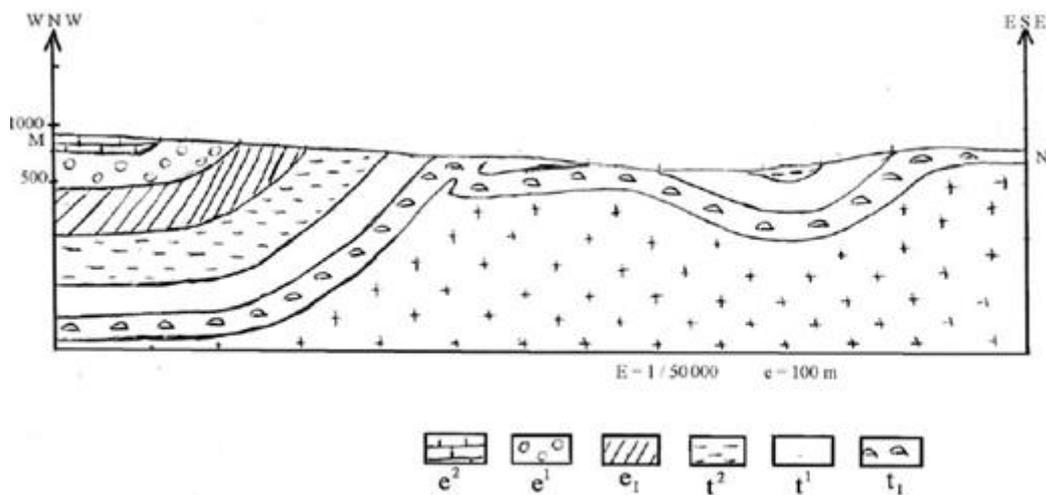
3. La structure géologique de cette carte est plissée car il y a :

-Répétition des couches au niveau des terminaisons périclinales

-Pendages dans divers sens

-Limites des couches non parallèles aux [courbes de niveau](#)

4. Profil et coupe géologique correspondants suivant le trait de coupe MN



Références bibliographiques

- [1] Alain Foucault & Jean-François Raoult. « Dictionnaire de Géologie » (4e édition) éd : Masson, 1995.
- [2] Bogomolov, G. «Hydrogéologie et notions de géologie d'ingénieur», Éditions du BRGM, 1984
- [3] 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.
- [4] Charles, Pomerol & Maurice, Renard. «Eléments de géologie» (11e édition), Coll. Enseignement des Sciences de la Terre - éd : Masson, 1997.
- [5] Daniel, J.Y « Sciences de la Terre et de l'Univers», Vuibert, Paris. 2015
- [6] Debelmas, J. & Mascle, G « Les grandes structures géologiques» .5e édition. Editions Dunod, Paris,2008.
- [7] Dercourt, J. «Géologie : cours et exercices ». Ed. Dunod, Paris. 1999
- [8] Jean, Dercourt & Jacques, Paquet. « Géologie : objets et méthodes » (9e édition), éd : Dunod, 1995.
- [9] Jean-Pierre, Michel. « Géologie Appliquée au Génie Civil » Notes du cours de prises par Olivier Germain au courant de l'année académique 1996-1997.
- [10] Pierre-André Bourque. « Planète Terre » cours de géologie générale Université Laval (Québec) disponible sur la toile, 2000
- [11] Walter Schumann « Guide des Pierres et Minéraux » (1e édition), éd:Delachaux & Niestlé. , 2000.
- [12] François Michel « Cahier de géologie» la région Île-de-France et du Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie, 2015
- [13] <https://cursus.edu/fr/19363/planete-terre-ou-comprendre-lorigine-de-la-planete>
- [14] <http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s1/tectonique.pl.html>
- [15] <http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/img.communes.pt/str.interne.terre.html>
- [16] <http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s2/mineral.roche.html>
- [17] <http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s2/esp.minerale.html>
- [18] <https://www.le-comptoir-geologique.com/identifier-mineraux.html>
- [19] <http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s3/vent.html>
- [20] https://www.reflexions.uliege.be/cms/c_11417/les-grandes-divisions-geologiques
- [21] https://fr.wikipedia.org/wiki/Structure_interne_de_la_Terre
- [22]<http://acces.ens-lyon.fr/acces/thematiques/limites/Temps/allee/comprendre/les-etapes-de-la-formation-de-la-terre>
- [23] <https://eduterre.ens-lyon.fr/thematiques/hydro/erosion/alteration>
- [24] <http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s3/glaces.html>
- [25] https://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosgeol/glossaire/plus_tectonique.htm

- [26] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8c/S%C3%A9isme-%C3%89picentre-Hypocentre-Faille_tectonique.jpg
- [27] <http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s1/seismes.html>
- [28] <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Volcanologie.html>
- [29] <https://www.alloprof.qc.ca/fr/eleves/bv/geographie/la-carte-topographique-g1065>
- [30] http://moodle.insa-toulouse.fr/file.php/301/content/geologie/7_cartographie.pdf
- [31] <https://www.postposmo.com/fr/tipos-de-rocas/>
- [32] https://www.youtube.com/watch?v=hMIyWUdD9_o
- [33] <https://eduterre.ens-lyon.fr/thematiques/terre/metamorphisme/generalites-lessentiel-de-ce-quel-faut-savoir>
- [34] <http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s2/princ.mineraux.html>
- [35] <https://musee-sismologie.unistra.fr/comprendre-les-seismes/notions-pour-petits-et-grands/la-sismicite/sismicite-dans-le-monde/>
- [36] <https://www.aps.dz/sante-science-technologie/119521-l-algerie-un-pays-sismique-avec-la-meme-intensite-depuis-au-moins-6-millions-d-annees>
- [37] <https://dyrassa.com/wp-content/uploads/2021/04/1-bac-biof-unite-1-24-30.pdf>
- [38] <https://f2school.com/wp-content/uploads/2019/11/Travaux-pratiques-de-cartographie-01.pdf>
- [39] https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Projection_st%C3%A9r%C3%A9ographique
- [40] https://fr.wikibooks.org/wiki/Cristallographie_g%C3%A9om%C3%A9trique/Projection_st%C3%A9r%C3%A9ographique
- [41] https://www.researchgate.net/publication/344396040_LA_PROJECTION_STEREOGRAPHIQUE_EN_TECTONIQUE
- [42] https://www.researchgate.net/figure/b-Legende-de-la-carte-geologique-au-50000e-de-Crest-BRGM-n-842-1976_fig1_342503611
- [43] <https://iast.univ-setif.dz/documents/Cours/InitiationAuxCartesEtAuxCoupesGeologiqueL2Geo21.pdf>