



ةيبعشذاةيطارقميدلاةيرنازجلاةير وهمجلا
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
ي ملعلاث حبلأ و ي لاعلام يلعلاةارازو



MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA
FACULTE DES SCIENCES EXACTES ET SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE
DEPARTEMENT DES SCIENCES AGRONOMIQUES

LA MINERALOGIE DES ARGILES

Support des Cours destinés aux étudiants en master 1

Sciences des sols dans les régions arides

TABLE DES MATIERES

	PAGE
CHAPITRE I GENERALITES SUR LA MINERALOGIE	5
1- DEFINITION :	5
2- MINERAL :	6
3- LES PRINCIPALES CLASSES DE MINERAUX :	6
3-1 ELEMENTS NATIFS :	6
3-2 OXYDES :	6
3-2-1 Les oxydes basiques :	6
3-2-2 les oxydes acides :	6
3.3 HYDROXYDES :	7
3-4 HALOGENURES :	7
3-5 CARBONATES :	7
3-5-1 La calcite :	7
3-5-2 La Dolomie .:	7
3-5-3 Aragonite :	7
3-6 PHOSPHATES :	7
3-7 SULFATES :	8
3-8 SILICATES :	8
3.8.1. Les nésosilicates	9
3.8.2. Les sorosilicates	9
3.8.3. Les cyclosilicates	9
3.8.4. Les inosilicates	9
3.8.5 .Les tectosilicates	9
3.8.6. Les phyllosilicates	9
4-LE CRISTAL	11
4. 1- DEFINITION :	11
4.1.1– LA MORPHOLOGIE	11
4.1.2– LA TEXTURE :	11
4.1.3– LA STRUCTURE :).	11
5- CRISTALLOGRAPHIE	12
5.1- CUBIQUE	12
5.2- QUADRATIQUE	12
5.3- ORTHORHOMBIQUE	12
5.4- MONOCLINIQUE	12
5.5- TRICLINIQUE	13
5.6-HEXAGONAL	13
5.7- RHOMBOEDRIQUE	13
*. POLYMORPHES	14
*L'ISOMORPHES	14
CHAPITRE II LA MINERALOGIE DES PHYLOSILLICATES	16

1.GENERALITES	16
2- CONCEPTS CRISTALLOGRAPHIQUES FONDAMENTAUX	17
2.1 - FEUILLET	17
2.2- COUCHE ELEMENTAIRE COMPACTE D'HYDROXYLE ET /OU D'OXYGENE	18
2.3-COUCHE ELEMENTAIRE HEXAGONALE D'OXYGENE	19
2.4 -COUCHES STRUCTURALES	19
2.4.1-UNITE STRUCTURALE TETRAEDRIQUE	19
2.4.2-UNITE STRUCTURALE OCTAEDRIQUE	19
2.5- MOTIF UNITAIRE	20
3. CLASSIFICATION DES MINERAUX ARGILEUX	21
3.1- CRITERES CRISTALLOCHIMIQUES DE CLASSIFICATION	21
3.1.1 EPAISSEUR REELLE DU FEUILLET	21
3.1.2 COUCHE DI ET TRI OCTAEDRIQUE	24
3.1.3 LES EQUIDISTANCES ENTRE FEUILLETS	24
3.1.4- LE CONTENU DU MOTIF UNITAIRE	24
3.1.5- LE MODE D'EMPILEMENT DE FEUILLETS IDENTIQUES	24
3.1.6- LE MODE D'EMPILEMENT DE FEUILLETS DE TYPES DIFFERENTS	24
4. MINERAUX ASSOCIES AUX ARGILES	25

CHAPITRE III LA GEOCHIMIE ET GENESE **27**

1. ORIGINE GEOLOGIQUE DES ARGILES.	27
1.1 LES MECANISMES GENERAUX DE FORMATION DES ARGILES.	27
1.1.1 L'HERITAGE.	27
1.1.2 LES TRANSFORMATIONS.	28
1.1.3 LES NEO GENESES (OU AUTHIGENESES).	28
2 L'ALTERATION: MODE DE PRODUCTION DES MINERAUX ARGILEUX	29
2.1 LES MODALITES DE L'ALTERATION CHIMIQUE.	29
2.2 L'ALTERATION DES SILICATES EN MINERAUX ARGILEUX.	30
# BISIALLITISATION.	30
# MONOSIALLITISATION.	30
# ALLITISATION.	30
2.3 REPARTITION GEOGRAPHIQUE DES MODES D'ALTERATION.	31
# AUX HAUTES LATITUDES	31
# SOUS CLIMAT TEMPERE	31
# SOUS LES CLIMATS CHAUDS ET HUMIDES, TROPICAUX ET EQUATORIAUX,	32
3. GEOCHIMIE DES MINERAUX ARGILEUX DANS LES ZONES ARIDES	35
CAS DE L'ATTAPULGITE	36
5. COMPORTEMENT PHYSIQUE DES ARGILES DANS UN MILIEU SALE	37

CHAPITRE IV L'ANALYSE MINERALOGIQUE	39
1-APERÇU SUR LES PRINCIPALES TECHNIQUES UTILISEES	39
1.1-LA METHODE CHIMIQUE	40
1.2-MESURE DE LA CAPACITE D'ECHANGE DE BASE (CEB)	40
1.3- MESURE DE LA SURFACE SPECIFIQUE PAR LA METHODE BET	41
1.4- L'ANALYSE THERMIQUE	41
1.4.1-L'ANALYSE THERMIQUE DIFFERENTIELLE (ATD)	42
1.4.2 L'ANALYSE THERMOGRAVIMETRIQUE ET L'ANALYSE PONDERALES DES GAZ ISSUS DE THERMOLYSE (APGT)	42
1.5 SPECTROMETRE INFRAROUGE	43
1.6 LA MICROSCOPIE ELECTRONIQUE	43
1.7 LA DIFFRACTION DES RAYONS X.	44
1.7.1. PRINCIPE DE LA DIFFRACTION DES RAYONS X	45
1.7.2 PREPARATION DES ECHATILLONS POUR LA DIFFRACTION	47
○ LA METHODE DES POUDRES DE DEBY- SHERER	47
○ LA METHODE DES AGREGATS ORIENTES:	47
1.7.3 - TRAITEMENT DES ECHANTILLONS	48
CHAPITRE V APPLICATIONS DES ARGILES.	49
1..SUR LE PLAN SCIENTIFIQUES.	49
1.1 Variations eustatiques.	49
1.2 Reconstitution de milieux.	49
2. DANS L'INDUSTRIE CHIMIQUE	50
3. DANS L'EXPLOITATION MINIERE	50
3.1.Les argiles, barrières aux hydrocarbures.	51
3.2.Les bentonites, argiles pour boue de forage.	51
4. INTERETS EN GEO-INGENIERIE ET EN GENIE CIVIL :	51
4.1. LES ARGILES, MEMBRANES POUR CONTENIR LES POLLUANTS.	51
4.2. LES ARGILES, PIEGES AUX COMPOSES RADIOACTIFS	52
5. INTERET AGRONOMIQUE: LE COMPLEXE ARGILO-HUMIQUE.	52
6..MATERIAU DE CONSTRUCTION ET D'OUTILLAGE	52
6.1 LA CONSTRUCTION ET LES CERAMIQUES.	52
6.2.LES ARGILES, COMPOSANTS DU CIMENT	53
7..LES INDUSTRIES PHARMACEUTIQUES ET COSMETIQUES :	53
8. QUELQUES AUTRES UTILISATIONS ANCIENNES	53
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	54

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LA MINERALOGIE

INTRODUCTION

La minéralogie, une des plus anciennes parmi les Sciences de la Terre, a pour but l'étude des minéraux, éléments ou composés naturels formant la croûte terrestre. Par extension, elle a été amenée à étudier les minéraux contenus dans les météorites et provenant d'autres parties de l'univers. Comme les roches sont le plus souvent des agrégats de minéraux de petite dimension, et comme la Terre est essentiellement faite de « roches », l'étude des minéraux est essentielle pour la compréhension de la Terre et des roches dont elle se compose (.CHABOU ,2005)

Les propriétés des minéraux sont étudiées sous les subdivisions qui leur correspondent, à savoir la minéralogie chimique, la minéralogie physique et la cristallographie. Les propriétés et la classification des minéraux individuels, leurs localités, leur façon de se former et leur utilisation sont étudiées sous la minéralogie descriptive. L'identification selon les propriétés chimiques, physiques et cristallographiques s'appelle la minéralogie déterminative. (CAILLERE ET AL,1963)

2- MINERAL :

Espèce chimique naturelle se présentant le plus souvent sous forme de solide cristallin, la classification des minéraux est basée sur leurs caractères chimiques et cristallographiques.

3- LES PRINCIPALES CLASSES DE MINERAUX :

3-1 ELEMENTS NATIFS : se dit d'un élément chimique métallique qui se trouve dans la nature à l'état pur, c'est par exemple le cas de l'or de l'argent parfois du cuivre, du fer, ...etc.

{ **Métaux**, corps simples, solides cristallins, caractérisés par une importante conductivité thermique et électrique, un éclat «!métallique!» . En général, ils sont ductiles aux températures ambiantes et opaques, sauf sous la forme de films extrêmement minces. }

3-2 OXYDES :

Composés chimiques constitués d'oxygène associé à un élément ou un radical. Dans l'écriture du composé, l'oxygène figure toujours en dernière position.

En fonction de leur comportement dans l'eau, on distingue les trois catégories d'oxydes suivantes :

3-2-1 Les oxydes basiques :

qui, lorsqu'ils sont solubles, forment des solutions basiques, sont des oxydes ioniques de métaux (oxyde de lithium Li_2O , oxyde de magnésium MgO)!;

3-2-2 les oxydes acides :

composés essentiellement covalents présentant un degré d'oxydation élevé (dioxyde de carbone CO_2 , silice SiO_2). Les oxydes sont très nombreux et leurs applications sont multiples. De nombreux oxydes métalliques résistent aux températures élevées : ils constituent des matériaux réfractaires (*voir* Céramiques nouvelles), comme

l'alumine (Al_2O_3); d'autres, comme le dioxyde de titane TiO_2 ou l'oxyde de zinc ZnO , sont employés comme pigments.

3-3 HYDROXYDES :

Composé métallique de formule générale $\text{M}(\text{OH})_n$ ou M et un métal ,hydroxyde de sodium $\text{Na}(\text{OH})$ est la soude l'hydroxyde de fer $\text{FeO}\cdot\text{OH}\cdot n\text{H}_2\text{O}$ (avec n de 1 à 3)

3-4 HALOGENURES :

Constitués par le fluor ,le chlore, l'iode et le brome il sont très actif de point de vue chimique ,le plus oxydant le fluor ,parvient à dissocier l'ozone atmosphérique on peut citer le sel gemme NaCl ,la fluorine CaF_2 et la sylvine KCl

3-5 CARBONATES :

Minérale caractérisé par l'ion $(\text{CO}_3)^{-2}$ ces minéraux sont nombreux mais seuls 03 d'entre eux sont abondants

3-5-1 La calcite : CaCO_3 (dite magnésienne si de 5 à 15% de mg)

3-5-2 La Dolomie : minéral courant de formule $\text{Ca Mg} (\text{CO}_3)_2$, que l'on trouve principalement sous forme d'importantes formations de calcaire dolomitique ou de dolomie, ou parfois en filons.

3-5-3 Aragonite : variété minérale de carbonate de calcium, de formule CaCO_3 , cristallisant dans le système orthorhombique (*voir* Cristal). L'aragonite est plus dure, moins courante et moins stable que la calcite, dans laquelle elle peut se transformer au cours des temps géologiques

3-6 PHOSPHATES :

Minéral caractérisé par le radicale $(\text{PO}_4)^{3-}$.Ces phosphates dérivent de l'apatite des régions magmatique mise en solution par l'eau des mers et fixé par les végétaux et les animaux (os 60 % de phosphates, les dents avec 90 %)à leurs morts de nouvelles solutions de phosphates sont formées parmi les nombreuses espèces notons

L'apatite (de Ca ou de Fe $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH},\text{Fe},\text{Cl})$,La Turquoise Bleu ($\text{CuAl}_6(\text{PO}_4)_4(\text{OH})_8,2\text{H}_2\text{O}$) et La Vivianite $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2,8\text{H}_2\text{O}$ et La Monazite

3-7 SULFATES :

Minérale caractérisé par le radicale $(\text{SO}_4)^{2-}$ coordonné à Ca , Ba ,Na , Sr .les principaux minéraux anhydres sont la barytine (BaSO_4) , la célestin (SrSO_4) et l'anhydrite (CaSO_4) ;la forme hydratée importante est le gypse $\text{CaSO}_4,2\text{H}_2\text{O}$

3-8 SILICATES :

Minérale caractérisé par le motif élémentaire tétraédrique $[\text{SiO}_4]^{-4}$ comportant un atome Si au centre et des atomes O au 4 sommets . Ces tétraèdres sont reliés entre eux soit par des cations ,soit en partie par un ou plusieurs atomes O commun de ce fait à 2 tétraèdres plus ce nombre O d'atomes commun est grand plus la température de cristallisation du silicate correspondant est faible .

Les silicates constituent environ 92% en poids de la totalité des minéraux formant la croûte terrestre (fig 1)d'où leur extrême importance

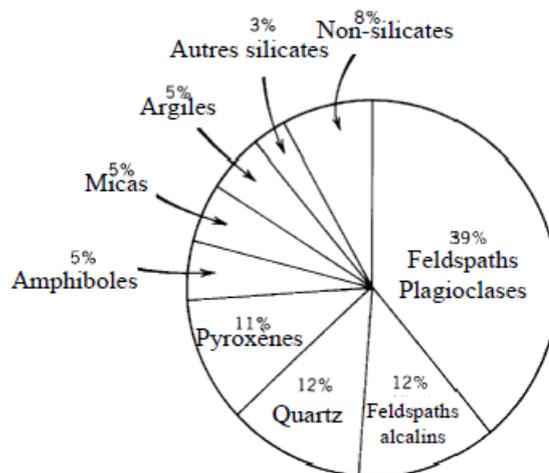


Figure 1 : Pourcentage en volume des minéraux de la croûte terrestre (continental+océanique). Les silicates représentent 92 %.(Langlois,2007)

Selon l'agencement de tétraèdres $(\text{SiO}_4)^{4-}$, on distingue six sous-classes de silicates :

3.8.1. Les néosilicates

Ces silicates se caractérisent par des îlots de tétraèdres $[\text{SiO}_4]^{4-}$ indépendants et isolés les uns des autres par des cations. La formule de base est $(\text{SiO}_4)^{4-}$. Une olivine composée de 50% Fe et 50% Mg aura une formule chimique $(\text{Fe},\text{Mg})\text{SiO}_4$. Une olivine composée de 80% Fe et 20% Mg aura une formule chimique $(\text{Fe}_{1,6},\text{Mg}_{0,4})\text{SiO}_4$. Une olivine composée de 80% Mg et 20% Fe aura une formule chimique $(\text{Fe}_{0,4},\text{Mg}_{1,6})\text{SiO}_4$.

3.8.2. Les sorosilicates

Tétraèdres unis par deux avec un O en commun (fig.2). La formule de base est $(\text{Si}_2\text{O}_7)^{6-}$. Les sorosilicates sont rares. Exemple : la lawsonite qui est un sorosilicate aluminocalcique $[\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})]$.

3.8.3. Les cyclosilicates

Les tétraèdres sont disposés en anneaux et suivant que ceux-ci possèdent trois $[\text{Si}_3\text{O}_9]^{6-}$, quatre $[\text{Si}_4\text{O}_{12}]^{8-}$ ou six tétraèdres $[\text{Si}_6\text{O}_{18}]^{12-}$ (fig.2). Exemple : Le béryl est un cyclosilicate de formule chimique $\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$. L'émeraude est une variété de béryl qui contient du chrome.

3.8.4. Les inosilicates

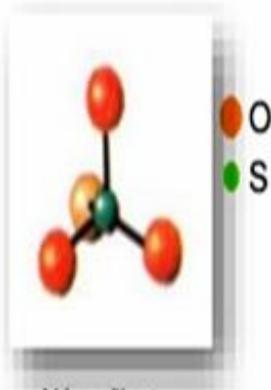
Chez les inosilicates, les tétraèdres sont disposés en chaînes. Chaque tétraèdre partage deux sommets avec ses voisins.

3.8.5. Les tectosilicates

Silicates dont les tétraèdres sont liés entre eux par leurs sommets. La formule de base est SiO_2 ou Si_4O_8 . Le **quartz** et les **feldspaths** sont les principaux tectosilicates.

3.8.6. Les phyllosilicates

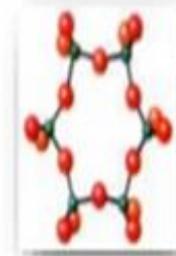
Silicates dont les tétraèdres sont disposés en feuillets (fig.2). Ils mettent en commun trois oxygènes. La formule de base est $(\text{Si}_2\text{O}_5)^{2-}$ ou $(\text{Si}_4\text{O}_{10})^{4-}$. L'exemple le plus important de phyllosilicates est la famille des micas. Il s'agit de silicates hydratés, plus ou moins alumineux et presque toujours potassiques, qui contiennent en proportion variable du fer et du magnésium.



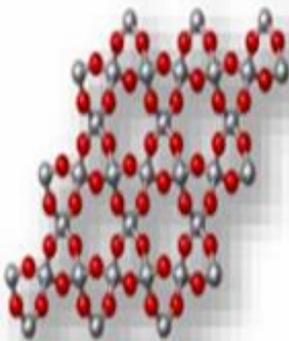
Nesosilicates
formés de tétraèdres $[\text{SiO}_4]^{4-}$
isolés, reliés par des cations
ex. : olivine, grenat, etc.



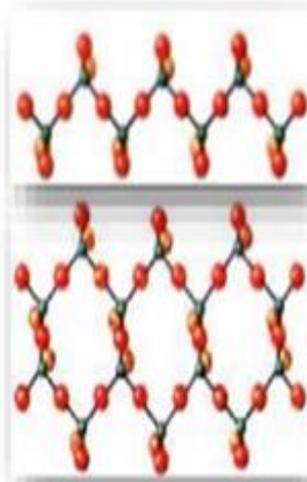
Sorosilicates
tétraèdres $[\text{SiO}_4]^{4-}$ unis par
deux avec un O commun



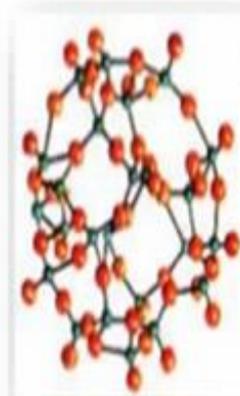
Cyclosilicates
tétraèdres $[\text{SiO}_4]^{4-}$ disposés en
anneau avec des O communs
ex. : tourmaline, émeraude etc.



Phyllosilicates
tétraèdres $[\text{SiO}_4]^{4-}$ disposés en
feuillets
ex. : argiles, micas



Inosilicates
tétraèdres $[\text{SiO}_4]^{4-}$ disposés en
chaîne simple (ex. pyroxène),
ou double (ex. amphibole)



Tectosilicates
tétraèdres $[\text{SiO}_4]^{4-}$ reliés par
leurs quatre sommets,
tous les O étant communs ex. :
quartz, feldspaths

Fig 2 les silicates

4-LE CRISTAL

4. 1- DEFINITION :

Solide de matière homogène présentant une structure atomique ordonnée et définie, et une forme extérieure limitée par des surfaces lisses, planes, disposées symétriquement. Un cristal se forme chaque fois qu'un solide se constitue progressivement à partir d'un fluide, que ce soit par congélation d'un liquide, par dépôt d'une substance dissoute ou par condensation directe d'un gaz.

La plupart des matériaux solides possèdent une disposition atomique ordonnée et sont de structure cristalline. Les solides qui n'ont pas de structure cristalline, comme le verre, sont dits **amorphes**. Dans leur structure, ils montrent une plus grande similitude avec les liquides qu'avec les solides : ce sont des liquides sur refroidis.

Après avoir fait partie de la minéralogie (qui est la description et l'étude des espèces constituant les roches naturelles), dont elle était une introduction, la cristallographie est devenue, depuis la fin du XIXe siècle, une science indépendante grâce aux développements de la chimie (et surtout de la chimie organique) où il a été montré que de très nombreux corps non-minéraux peuvent prendre la forme cristalline.

C'est maintenant une branche importante des Sciences Physico-Chimiques, destinée à pouvoir mener l'étude de la *morphologie*, de la *texture* et de la *structure* des cristaux :

4.1.1– **LA MORPHOLOGIE** : est la description complète de la forme extérieure (macroscopique) d'un *monocristal* au moyen de la mesure et du repérage des angles des facettes limitantes de la matière (dièdres)

4.1.2– **LA TEXTURE** : est la description de la *forme*, des *dimensions*, et de l'*orientation mutuelle* des monocristaux dans un matériau polycristallin (constitué d'un ensemble de monocristaux) tel qu'un métal, une poudre, un sol, une céramique, etc.

4.1.3– **LA STRUCTURE** : est la description complète de l'*empilement des individus* (*atomes, ions, ou molécules*) constituant le cristal lui-même (phase homogène).

La science moderne définit l'état cristallin comme l'un des états caractéristiques de la matière, celui où elle apparaît avec un maximum d'ordre ; de cet ordre découlent des propriétés physiques particulières.

5- CRISTALLOGRAPHIE

On appelle cristallographie la science qui étudie la formation, la forme et les caractéristiques géométriques des cristaux. Quand les conditions sont favorables, chaque élément et chaque composé chimique tendent à cristalliser selon une forme définie et caractéristique. Les minéraux de chaque système partagent certains détails de symétrie et de forme cristalline ainsi que de nombreuses propriétés optiques.

Les sept systèmes de cristallisation sont très importants pour les minéralogistes et les gemmologues (spécialistes des pierres précieuses) qui y recourent pour la description de chaque minéral. Fig 03

5.1- CUBIQUE

Ce système comprend des cristaux présentant trois axes, tous perpendiculaires entre eux et tous de même longueur. L'élément de base est un cube.

5.2- QUADRATIQUE

Ce système comprend des cristaux présentant trois axes, tous perpendiculaires entre eux et dont deux sont de même longueur. L'élément de base est un prisme droit à base carrée.

5.3- ORTHORHOMBIQUE

Ce système comprend des cristaux présentant trois axes, tous perpendiculaires entre eux et tous de longueur différente. L'élément de base est un parallélépipède rectangle.

5.4- MONOCLINIQUE

Ce système comprend des cristaux présentant trois axes de longueur inégale, dont deux forment un angle différent de 90° , le troisième leur étant perpendiculaire. L'élément de base est un prisme oblique à base losange.

5.5- TRICLINIQUE

Ce système comprend des cristaux présentant trois axes de longueur inégale et formant entre eux des angles différents de 90° . L'élément de base est un parallélépipède à base losange.

5.6-HEXAGONAL

Ce système comprend des cristaux présentant quatre axes. Trois de ces axes, de même longueur, sont dans un même plan et font entre eux un angle de 120° . Le quatrième axe, perpendiculaire aux trois autres, est un axe d'ordre 6 (rotation de 60°). L'élément de base est un prisme droit à base losange.

5.7- RHOMBOEDRIQUE

Ce système est identique au système hexagonal, mais le quatrième axe y est d'ordre 3 (rotation de 120°). L'élément de base est un parallélépipède dont toutes les faces sont des losanges.

Remarque :

***. Polymorphes**

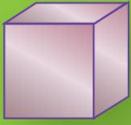
Les polymorphes sont des minéraux qui possèdent la même formule ou composition chimique mais cristallisant dans des systèmes différents. Exemple : le carbone (C) possède deux polymorphes : le graphite, qui cristallise dans le système rhomboédrique, est un minéral très tendre, et le diamant qui cristallise dans le système cubique et constitue le minéral le plus dur dans la nature. Les diamants se forment à très haute pression et température à plus de 150 km de profondeur et sont ramenés en surface par une roche volcanique qu'on appelle kimberlite.

***L'Isomorphes**

Les isomorphes sont des minéraux ayant la même structure cristalline, mais ayant des compositions chimiques différentes. Exemple : La forsterite Mg_2SiO_4 et la fayalite Fe_2SiO_4 sont des isomorphes : il appartiennent à la famille des olivines cristallisant dans le système orthorhombique et de formule chimique générale $(Mg, Fe)_2SiO_4$. Le Mg^{2+} peut être remplacé par Fe^{2+} dans la formule des olivines et vice-versa (car ces deux éléments ont des propriétés chimiques similaires).

Prismes de Réseaux

Cubique
Bases : 2 carrés,
Faces : 4 carrés



Quadratique
Bases : 2 carrés,
Faces : 4 rectangles



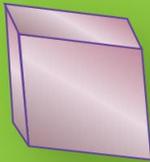
Orthorhombique
Bases : 2 rectangles
Faces : 4 rectangles



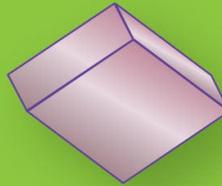
Monoclinique
Bases : 2 rectangles
Faces : 2 rectangles,
2 parallélogrammes



Triclinique
Bases : 2 parallélogrammes
Faces : 4 parallélogrammes



Rhomboédrique
Bases : 2 losanges
Faces : 4 losanges



Hexagonal
Bases : 2 hexagones
Faces : 6 rectangles

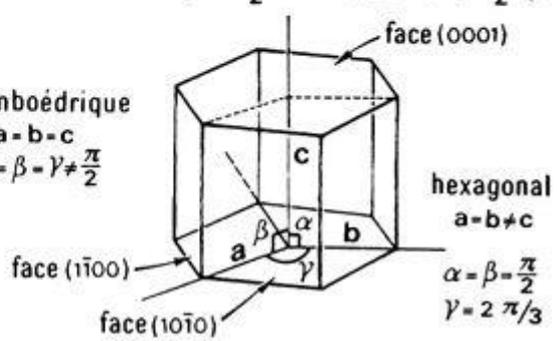
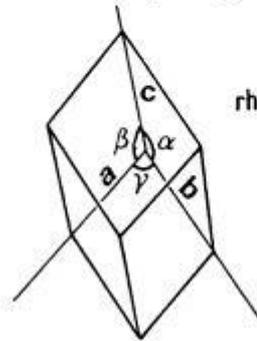
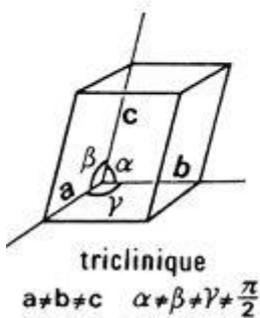
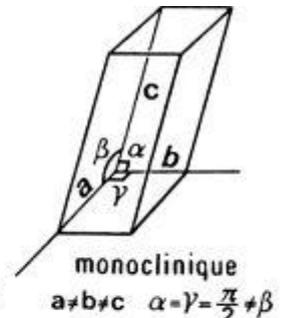
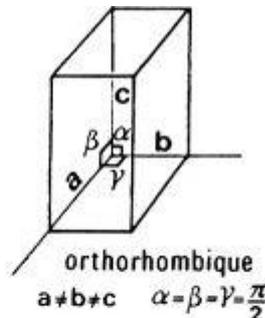
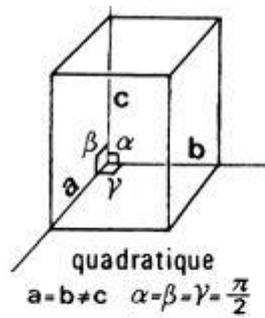
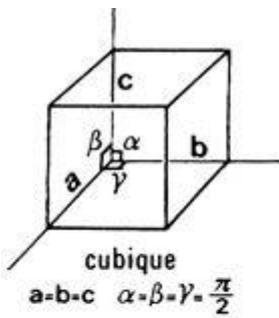


Fig 03 les sept systèmes de cristallisation

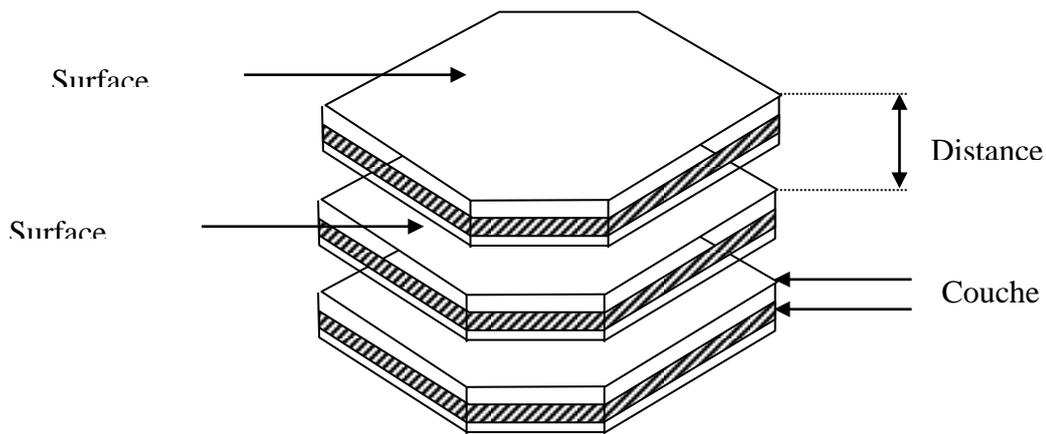
CHAPITRE II

LA MINERALOGIE DES PHYLOSILLICATES

1. GENERALITES

Le concept d'argile a fortement évolué dans le temps, Les anciens savants se heurtaient à une difficulté due au très petites dimensions des particules constituant ces matériaux, C'est grâce aux travaux, d'Atterberg (1913) que le séminaire international de science du sol de 1926 a défini l'argile comme la fraction granulométrique inférieure à 2 microns (Mesrouk, 1980).

Mais reste que cette définition est insuffisante car il existe d'une part des roches argileuses compactées comme les argilites et certaines marnes et d'autres part des minéraux fins qui n'ont pas les propriétés caractéristiques de l'argile, C'est ainsi en 1928 à partir des travaux de diffractométrie à rayons X sur les mica Mauguin et Pauling, (1930) ont introduit la notion de structure pour arriver à définir les argiles comme étant des silicates d'aluminium plus ou moins hydratés à structures microcristalines formées d'un empilement de feuillets dont la composition et le nombre caractérisent le feuillet typique de chaque type d'argile. Chaque couche est elle même formée par la juxtaposition dans un plan d'édifice cristallin simple de tétra ou d'octaèdre (Rezak,1980) schématisé par Vainovitché (1971)(Fig 4).



**Fig. 4 Organisation générale des minéraux argileux
(Vainovitch 1971)**

2- CONCEPTS CRISTALLOGRAPHIQUES FONDAMENTAUX

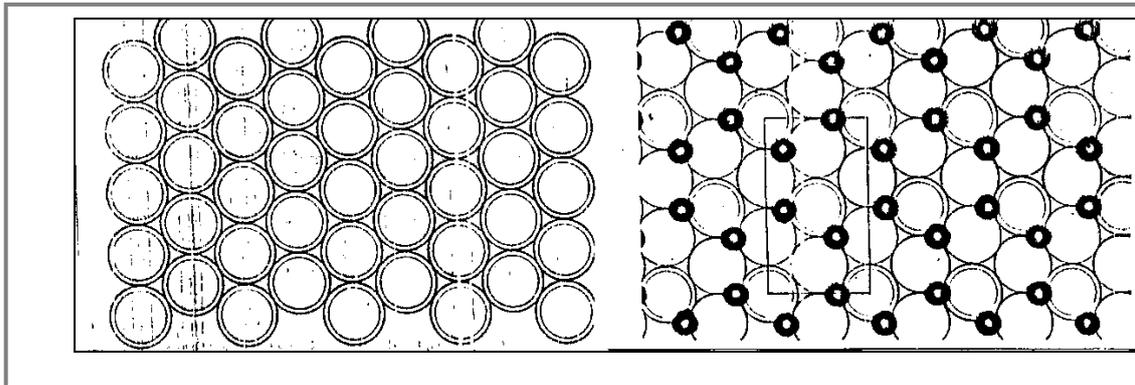
2.1 - FEUILLET

Particules élémentaire des phyllosilicates, ou silicates Lamellaires, ne peuvent être isolée que dans le cas d'une dispersion idéale en milieu liquide, Il est constitué suivant les conceptions de construction cristalline:

- Par la juxtaposition bidimensionnelles des motifs unitaires en formant une mono couche.
- Par la superposition de couches structurales tétraédriques et octaèdre étroitement liées
- Par l'empilements de couche élémentaire d'ions oxygène et / ou d'hydroxyle en disposition soit hexagonale ,soit compacte.

2.2- COUCHE ELEMENTAIRE COMPACTE D'HYDROXYLE ET /OU D'OXYGENE

Couche au plan dit réticulaire constitué par l'assemblage compacte de sphères (au ions) d'hydroxyles et ou d'oxygène [qui est obtenue en décalant d'un rang sur deux de la valeur d'un rayon(fig.5).



**Fig 05 : Couche compacte d'hydroxyles Couche compacte d'oxygène et
d'hydroxyles**

**Les cercles simples figurent les ions oxygène, les cercles doubles les OH -(Caillere
et Henin 1963)**

2.3-COUCHE ELEMENTAIRE HEXAGONALE D'OXYGENE

Couche au plan réticulaire constituée par l'assemblage d'ions oxygène uniquement qui est obtenue en retirant dans une couche compacte un ion sur deux tous les deux rangs, l'ensemble de six sphères délimitent les cavités quasi hexagonales (fig. 6)

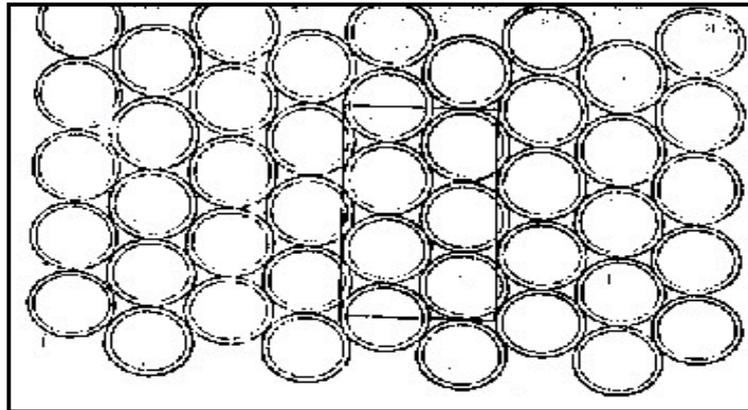


Fig.6

Couche hexagonale d'oxygène

2.4 -COUCHES STRUCTURALES

Assemblage monocouche d'unités structurales soit tétraédrique ou soit octaédrique :

2.4.1-UNITE STRUCTURALE TETRAEDRIQUE

Elément de structure formé par quatre ions oxygène enfermant en leur centre un ion silicium SiO_4 Schématiquement elle est matérialisée par la cavité comprise entre trois sphères en contact d'une couche d'oxygène et une sphère de la couche compacte d'oxygène, faisant un réseau de quatre faces (fig. 7).

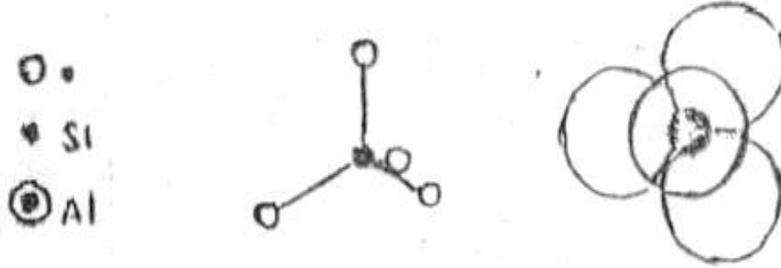


fig. 7: Disposition tétraédrique. Elle montre la constitution d'un tétraèdre. Les trois cercles supérieurs appartiennent à la couche hexagonale, le cercle inférieur représente un oxygène de la couche compacte

2. 4.2-UNITE STRUCTURALE OCTAEDRIQUE

Elément de structure formé par 6 ions hydroxylique ou oxygène enfermant en leur centre un ion aluminium ou de manganèse faisant huit faces. Elle est la base de la structure des feuillets gibissitique $Al(OH)_3$ ou brucitique $Mg(OH)_2$, Elle est matérialisée par la cavité délimitée entre six sphères jointive de deux couches compactes d'hydroxyles et ou d'oxygène. Les deux couches se représentent de telle sorte que le triangle équalatérale formée par les centres des trois sphères de l'une ait ses sommets opposés a ceux du triangle faisant vis a vis de la couche voisine (fig. 8).

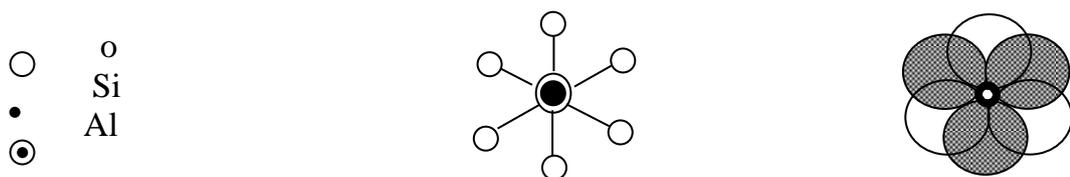


Fig. 8: Disposition Octaédrique .Elle montre la constitution d'un octaèdre. Les trois cercles supérieurs appartiennent à une couche compacte supérieur les trois autres appartiennent à une couche compacte inférieur

2.5- MOTIF UNITAIRE

C'est la maille cristallographique de minéraux phylliteux, il est le plus petit élément de volume susceptible de rendre compte a la fois par sa répétition dans les deux directions

orthogonales de reconstituer le feuillet .Sa représentation schématique doit autant que possible satisfaire a la fois l'ordonnancement structurale, la composition chimique et la neutralité électrique.

3. CLASSIFICATION DES MINERAUX ARGILEUX

Basée sur les propriétés cristalochimiques, la classification de Henin, (1963) tient compte des principes de base de la minéralogie, car les minéraux argileux doivent leur particularités justement au critère physico-chimique en particulier ionique d'une part et d'autre part leurs état de division, afin de regrouper les différents minéraux d'après leur propriétés essentielle et aussi de permettre grâce a l'association de quelques données fondamentale de constituer une trame couvrant l'ensemble des cas possibles, d'après Vainovitch, (1971) les critères retenus par Henin (1963) sont :

3.1- CRITERES CRISTALLOCHIMIQUES DE CLASSIFICATION

3. 1. 1 EPAISSEUR REELLE DU FEUILLET

La valeur de l'épaisseur de feuillet est le critère de classification le plus important, il suffit a lui seul pour déterminer le nombre et la nature des couches structurales constitutives, Elle est qualifiée de réelle pour bien indiquer qu'elle est relative au feuillet et non aux équidistances inter-feuillets que donne le diagramme de rayon X, La différence entre épaisseur et équidistance résulte de l'interposition fréquente de molécules d'eau ou d'ion échangeable, Cependant pour traduire l'association des couches structurales on utilise la notation du type 1/1,2/1,2 /1/1, le premier chiffre désigne le nombre de couche tétraédrique le second celui des octaédriques principales, le troisième caractérise une couche octaédrique complémentaire, c'est ainsi que les principaux groupes définis sont :

1. Minéraux à $7A^\circ$ (1/1) dont les types sont les Kaolinites et l'antigorite

2. Minéraux à 10 Å (2/1) dont les types sont les Mica, le Talc, et la montmorillonite

3. Minéraux à 14 Å (2/1/1) dont le type est la chlorite (Fig.9)

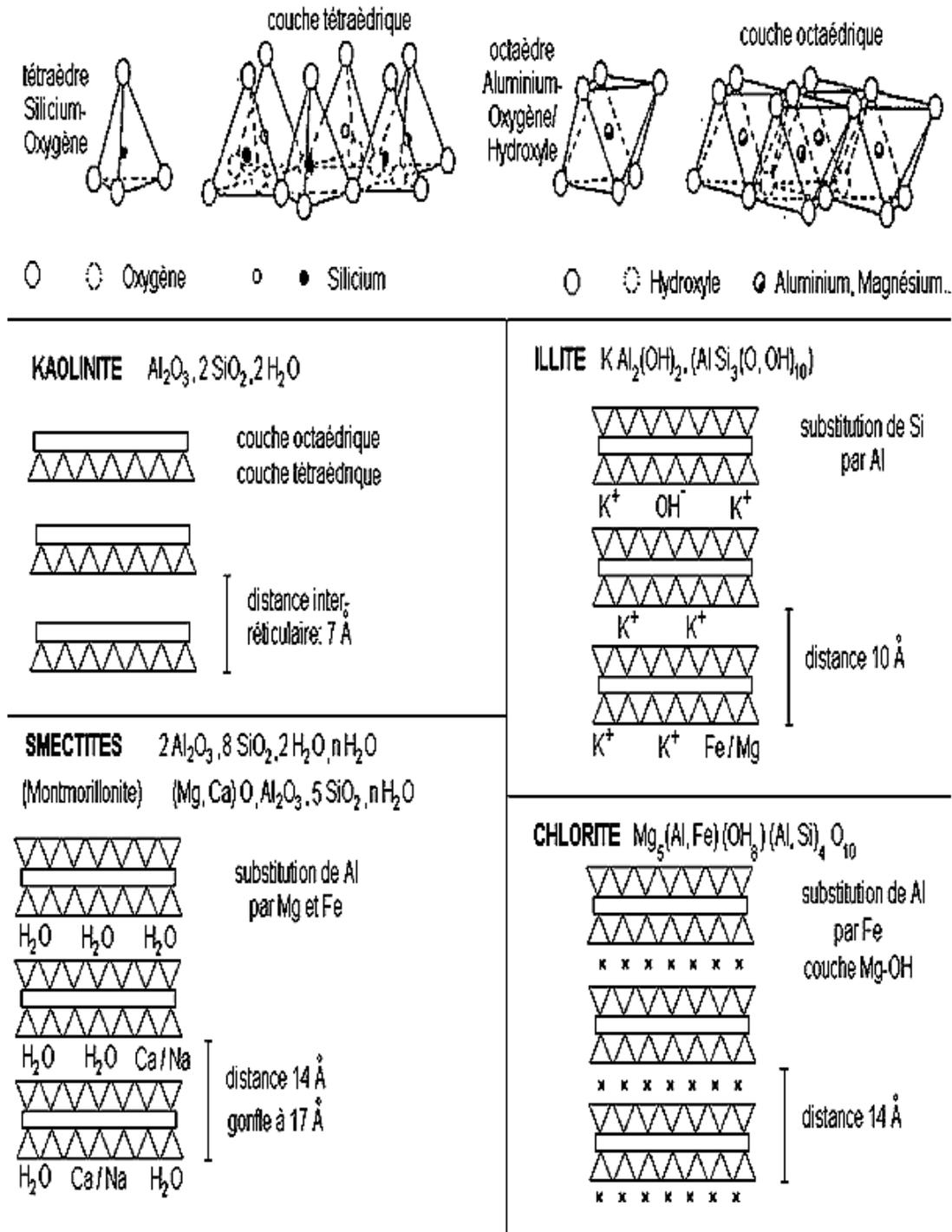


Fig :9 . représentations schématiques des structures des principaux minéraux phylliteux

(d'après Millot , 1964)

3.1.2- COUCHE DI ET TRI OCTAEDRIQUE

Ceci concerne le degré d'occupation des sites de la couche octaédrique. Ce sont les cavités octaédriques formées par l'empilement de deux couches élémentaires d'hydroxyles et / ou d'oxygène. Elles ne sont pas toutes accessibles aux cations seules le sont, celles disposées suivant un réseau hexagonal. Ces cavités disponibles ou sites sont occupées à raison de deux sur trois par les cations trivalent d'aluminium, lorsque les cations divalent de magnésium remplacent les précédents, mais sur la base de 3 Mg^{++} pour 2 Al^{++} afin que l'équilibre électrique subsiste, tous les sites disponibles sont alors occupés par suite, Les groupes structuraux cependant sont subdivisés en minéraux dioctaédrique (2 sites occupés sur trois) et minéraux tri octaédrique (trois sites occupés sur trois).

3. 1.3–LES EQUIDISTANCES ENTRE FEUILLETS

Les équidistances entre feuillets peuvent varier par interposition de molécules d'eau ou d'ions échangeables.

3.1.4- LE CONTENU DU MOTIF UNITAIRE

Son contenu est variable, suivant la nature des cations et suivant la localisation de ceux-ci, des symboles assez souvent adoptés de type $Te < 4$ si ou $Oc > 12/12$ signifient respectivement que la couche tétraédrique à des cations siliceux remplacés par d'autre et que la couche octaédrique accuse une surcharge.

3.1.5- LE MODE D'EMPILEMENT DE FEUILLETS IDENTIQUES

Qui peut être plus ou moins régulier ; Il peut y'avoir pour les motif unitaire de chacun des feuillets successifs une correspondance exacte, décalage régulier ou finalement un décalage totalement désordonné.

3.1.6- LE MODE D'EMPILEMENT DE FEUILLETS DE TYPES DIFFERENTS

Les feuillets sont associés en donnant une certaine répétition.

la classification des phyllosilicates établi par Caillere et Henin, (1963 est représenté dans les tableaux suivants.

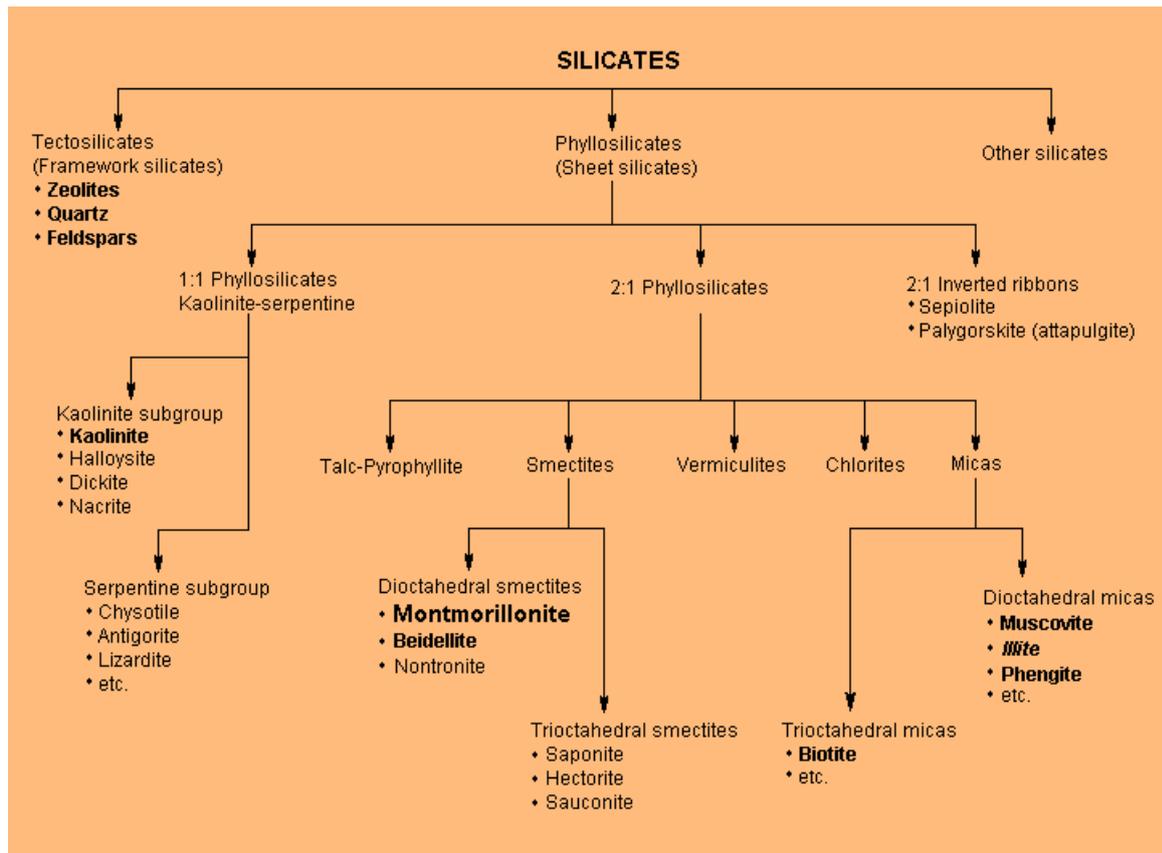


Fig.10 1. Classification des silicates (Rieder et al., 1998).

4. MINÉRAUX ASSOCIÉS AUX ARGILES

Si l'on revient à la définition granulométrique des argiles, il faut repenser le problème minéralogique, car il est évident que des nombreuses espèces peuvent se présenter à l'état de particules si fines qu'elles se trouvent isolées avec la fraction argileuse (Cailler et Henin, 1963), ces minéraux pour la plupart d'entre eux sont identiques à ceux rencontrés dans le limon mais se trouvant dans un état de division plus poussée.

Le quartz qui est extrêmement répandu on le trouve pratiquement associé à tous les types d'argile, La cristobalite, les feldspaths et la calcite sont fréquemment trouvées dans la fraction argileuse de certains sols et dans diverses roches, il en est de même pour d'autres carbonates comme la dolomite, On trouve aussi l'hématite, les pyrites et parfois l'anatase ... etc. sans oublier le gypse et les sels solubles qui le plus souvent sont alcalins ou magnésiens (chlorures, sulfates).

La présence de ces minéraux soulève un certain nombre de problèmes. D'une part, ils peuvent gêner l'identification des constituants principaux et d'autre part, leurs propriétés peuvent se superposer et modifier celles des constituants argileux formant l'essentiel de l'échantillon. Par contre, ils peuvent être intéressants à déterminer en cas où ils fournissent des indications sur les processus de genèse des minéraux argileux (Guez, 1984).

CHAPITRE III

LA GEOCHIMIE ET GENESE

1. ORIGINE GEOLOGIQUE DES ARGILES.

1.1 LES MECANISMES GENERAUX DE FORMATION DES ARGILES.

Trois origines des minéraux argileux sont classiquement délimitées dans la littérature:

1.1.1 L'HERITAGE.

Par ce terme, on désigne simplement les minéraux argileux présents dans une roche, et que l'altération libère intacts, sans modification, dans le sol ou les formations détritiques résultantes, ou des argiles formées à partir d'une autre roche et accumulées dans celle étudiée.

libération
roche-mère -----> argiles

Cependant, il est rare que les minéraux argileux n'aient réellement subi aucune modification, même limitée.

1.1.2 LES TRANSFORMATIONS.

Dans ce cas - ci, des minéraux formés auparavant, ou apportés d'ailleurs, subissent des réarrangements de leurs réseaux silicatés, sans destruction complète de leur

organisation précédente. Ils évoluent ainsi vers un nouvel état d'équilibre, avec les conditions locales du milieu dans lequel ils sont inclus. On distingue, dans ces transformations, la dégradation, c'est-à-dire les processus allant dans le sens de l'altération, autrement dit de l'apparition d'une structure cristalline moins régulière, et d'une perte de substance. C'est un processus commun dans les sols.

Le processus inverse porte le nom d'aggradation, et se rencontre dans les systèmes sédimentaires, car il implique souvent des augmentations de température et de pression.>

(Remarque : ne pas confondre l'*aggradation*, ici définie, et l'*aggradation* (avec deux g), qui est un mode de croissance des systèmes sédimentaires au cours du temps, défini par la stratigraphie séquentielle, correspondant à un équilibre entre le volume des apports sédimentaires et l'espace disponible dans le bassin).

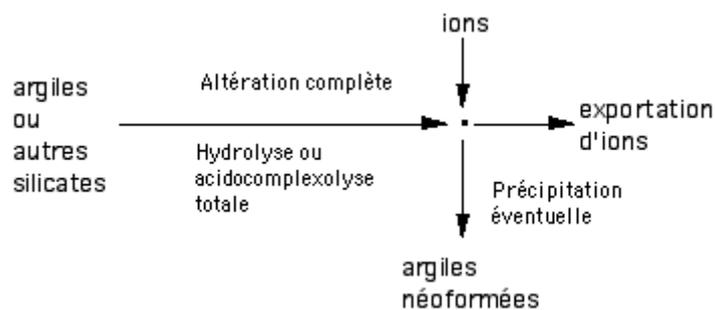
Dégradation ->

Argiles ou autres silicates <-----> argiles

<- Aggradation

1.1.3 LES NEOGENESES (OU AUTHIGENESES).

Ce processus correspond à une réorganisation complète de la structure cristalline. Elle intervient forcément quand une argile est formée à partir de certains silicates, comme les amphiboles, les péridots, ou les feldspaths.



2 L'ALTERATION: MODE DE PRODUCTION DES MINERAUX ARGILEUX

2.1 LES MODALITES DE L'ALTERATION CHIMIQUE.

On rappellera simplement ici les grands traits de l'altération, avec les figures suivantes :

SCHEMA DE L'EVOLUTION MINERALE.

Minéral primaire + solution d'attaque -> minéral secondaire + solution de lessivage
(roche-mère) (eau plus ou moins chargée) (complexe d'altération) (eau de drainage)

MECANISMES PRINCIPAUX D'ALTERATION.

	pH < 5	5 < pH < 9,6	pH > 9,6
Solution diluée en éléments salins (env. N/1000)	Acidolyse Eaux chargées en acides organiques	Hydrolyse Eaux pures ou chargées en CO ₂	
Solution concentrée en éléments salins (Na, K, Ca)		Salinolyse Eaux chargées en sels d'acides forts (chlorures, sulfates)	Alcalinolyse Eaux chargées en sels d'acides faibles (carbonates et bicarbonates)

Fig 11 : Principaux mécanismes d'altération superficielle des roches selon les caractères des solutions ioniques (LANGLOIS,2004)

2.2 L'ALTERATION DES SILICATES EN MINERAUX ARGILEUX.

On rappellera seulement ici les trois grandes étapes de l'hydrolyse selon son efficacité, avec l'exemple classique de l'hydrolyse de l'orthose: l'hydrolyse constitue la principale réaction de dégradation. (LANGLOIS,2004)

BISIALLITISATION.

Silice et cations basiques ne sont pas totalement lessivés. On aboutit à des phyllites 2/1 (montmorillonite, illite, vermiculite), caractérisées par la présence de cations basiques interfoliaires (K⁺, Na⁺).

orthose ---> illite + solution



(Perte en silice: 60%, perte en potassium: 67%)

MONOSIALLITISATION.

Les cations basiques sont ici totalement éliminés, et une part encore supérieure de la silice : il se forme des silicates argileux de type 1/1 :

---> solution



ALLITISATION.

C'est l'hydrolyse totale. Silice et cations échangeables sont entraînés tandis que l'alumine précipite sur place. Ces produits accumulés sur place correspondent couramment à des hydroxydes d'aluminium du type gibbsite ou boehmite.

orthose ---> solution



2.3 REPARTITION GEOGRAPHIQUE DES MODES D'ALTERATION.

L'altération des minéraux en argiles, entre autre par l'hydrolyse, dépend des conditions climatiques : chaleur, qui accélère les réactions chimiques, pluviosité, vent et autres agents mécaniques. En conséquence, les minéraux argileux issus de l'altération et qui sédimentent, se répartissent selon une disposition zonale latitudinale, superposée à celle des grands types de climats. Fig 12

AUX HAUTES LATITUDES

(climat glaciaire), où l'eau est peu disponible et la température basse, l'altération physique prédomine, et donne des minéraux proches de ceux de la roche-mère (héritage) : Ce sont surtout des *illites*, de la *chlorite* et des minéraux non argileux. Localement s'y ajoutent des minéraux hérités des couvertures sédimentaires anciennes démantelées, comme la kaolinite mésozoïque dans les mers arctiques.

SOUS CLIMAT TEMPERE

, l'hydrolyse dégrade et transforme partiellement les minéraux: les sols bruns qui s'y forment contiennent des illites ouvertes, des interstratifiés irréguliers divers, à composition plus smectitique que vermiculitique plus l'humidité augmente, des vermiculites et des smectites de dégradation mal cristallisées (*pseudobisillitisation*). Si le drainage des solutions de lessivage est actif, le stade *kaolinite*, voire *gibbsite*, peut être atteint par les minéraux les plus fragiles, comme les feldspaths.

SOUS LES CLIMATS CHAUDS ET HUMIDES, TROPICAUX ET EQUATORIAUX,

l'hydrolyse intense permet la formation de manteaux d'altération épais, dont le développement induit un nivellement des reliefs : Ce sont les sols rouges intertropicaux (*latérites s.l.*), souvent marqués par une cuirasse d'accumulation ferrifère. Les minéraux néoformés, surtout la *kaolinite* et les oxydes métalliques, plus

ou moins hydratés (*gibbsite*, *goethite*), s'y développent, indépendamment ou presque de la nature de départ de la roche-mère. Allitisation et monosiallisation dominent. (LANGLOIS,2004)

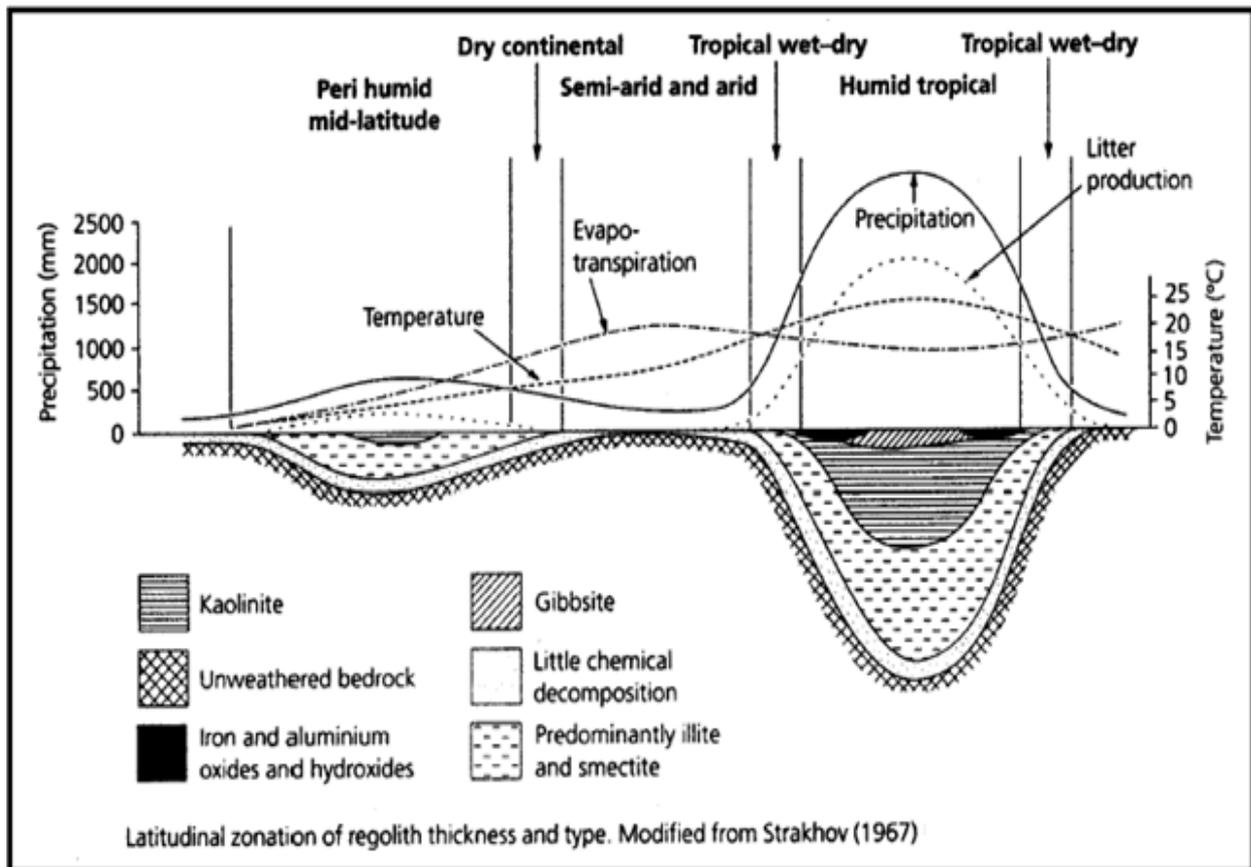


fig 12 Hydrolyse et zonation climatique (Allen, 1997).

3. GEOCHIMIE DES MINERAUX ARGILEUX DANS LES ZONES ARIDES

Les régions arides se situent dans un schéma dressé par Pedro, (1987) sur la distribution géographique des différents modes d'altération dans une zone dite

d'altération ménagée, définie par un dynamisme lent et progressif cette région caractérisée d'une manière globale par le maintien pendant longtemps dans les horizons de minéraux altérables, et aussi par l'individualisations discrète d'argile.

Le cortège minéralogique provient essentiellement d'héritage des phyllites de la roche mere et de transformation (inter-intrafolière) en phase solide. Les néoformations au sens strict n'occupe ici qu'une place mineure et ne concerne que les constituants accessoires (calcite, gypse, halite...).

La phase saline dans les sols sahariens joue un rôle inéluctable et constitue le siège d'innombrables, processus pédogénétiques, entre autre l'évolution géochimique des minéraux primaires et secondaires.

Dans les bassins sédimentaires où les solutions sont plus riches en ions que les solutions de lessivage, les minéraux se trouvent dans un milieu plus saturé que celui dont ils proviennent, alors les ions se glissent dans les espaces interfoliés des minéraux argileux : le potassium dans l'espace interfolier, le magnésium et l'aluminium entrent dans la structure du feuillet (Lucas, 1965). Ce sont des transformations qui ne s'exercent pas sur les ions interfoliés seulement, mais aussi sur le feuillet lui-même. Ainsi l'aggradation concerne et modifie tout le minéral (fig13).

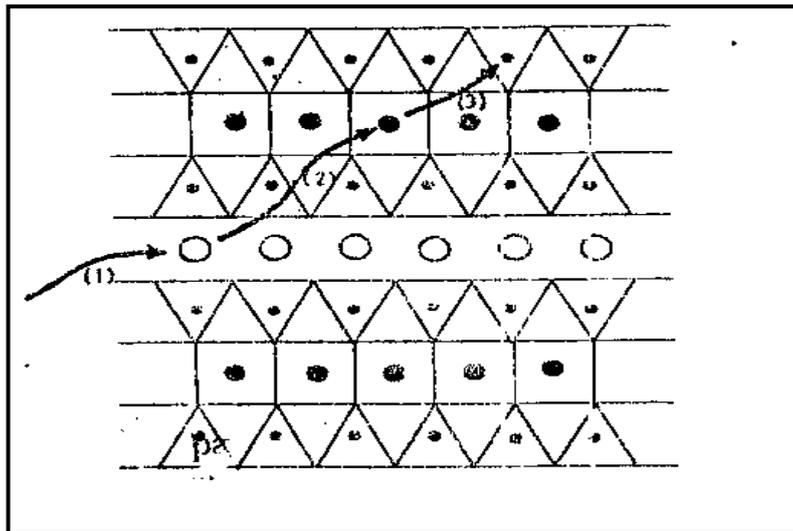


Fig 13 : Agradation d'un minéral argileux à trois couches
(1) Entrée des ions position interfoliaire
(2) Migration des ions interfoliaires en position octaédrique
(3) Migration des ions octaédriques en position tétraédrique

Ainsi donc, à partir des anciens réseaux il y a reconstitution progressive par augmentation de la charge du feuillet, tendance à la fermeture des espaces interfoliaires, cicatrization des minéraux suivie finalement d'agrandissement des cristaux (Allegre, 1973).

Dans un bas fond soumis à l'évaporation, le milieu confiné évolue par addition, les ions s'y accumulent, les solutions s'y concentrent et les minéraux dégradés vont s'y agrader. En résumé l'évolution géochimique dans les paysages arides est le fruit de la soustraction géochimique en altitude nourrissant les évolutions par addition de la plaine aride (Paquet, et al, 1969).

Pour Kulbicki et al (1960), K^+ et Mg^{++} contenue dans l'eau salée contribuent à la transformation des minéraux. La montmorillonite se transforme en chlorite et Illite bien organisée par regarnissage du réseau cristallin. Par ailleurs Johns et Grim, (1954) constatèrent dans une étude séquentielle que la teneur en illite augmente au détriment de la montmorillonite et de la chlorite dégradée au fur et à mesure que l'on chemine

vers les milieux confinés. En Australie Langham (1962) conclut que l'illite se forme dans un milieu salé à partir de la montmorillonite originaire d'apports alluvionnaires.

L'expérimentation au laboratoire a révélé après un traitement sur une série de minéraux argileux pendant des années, par une solution saline, l'apparition au rayon x des raies d'illite, et de chlorite formées par agradation à partir de la montmorillonite (Carter et Withous, 1973). Par ailleurs dans le Sahara central Rognon, (1967) décèle dans les formations actuelles du Quaternaire une forte dominance de la montmorillonite avec accessoirement de la Kaolinite. Il estime que dans le milieu hydromorphe confiné, tous les silicates convergent vers la montmorillonite par transformation, La Kaolinite, reste le témoin d'un héritage ou, d'altération antérieure.

Jayenes, (1989) a trouvé que la substitution de l'aluminium par le silicium au niveau des tétraèdres des Illites conduit à une transformation de cette dernière vers la montmorillonite. L'ouverture des Illites se produit lorsque les forces d'expansion qui s'exercent sur les bords des cristaux excèdent celle de l'attraction dans un milieu où règne un lessivage progressif des bases. Cependant le climat actuel du Sahara algérien ne peut concevoir de tel mécanismes, encore moins l'éventuelle néoformation des Kaolinite et des chlorites qui ne sont que le fruit d'un héritage sous un environnement pédoclimatique différent de l'actuel (Hallitim, 1988.)

Il faut part ailleurs souligner que dans les sols Saharien il faut considérer d'une manière généralisée, l'action déflatoire qui est occasionnée sur les unités morphologiques qui influence ainsi sur la distribution des minéraux argileux, L'uniformité granulométrique et minéralogique rencontrée dans les sables de recouvrement au niveau du glacis et les zones des sites élevés, d'une même zone en témoigne (Ben Nadji, 1998).

. CAS DE L'ATTAPULGITE

Par sa nature peu stable sous les conditions climatiques humides (Schohen , 1969) sa présence constitue un caractère généralement spécifique des sols de la zone arides , Son étude revêt un grand intérêt théorique en particulier concernant sa genèse, Dans ce contexte plusieurs hypothèses ont été émises, mais celle de la néoformation qui a requis l'unanimité (Heuvel, 1966, Millot et al 1969, Belouam, 1976...).

C'est à partir des observations recueillies dans les sols de la basse Moulaya (Maroc) que Millot et Paquet, (1969) constatèrent du fait de l'absence de ce minéral fibreux dans les amphithéâtres géologiques et sa présence en abondance dans les carapace calcaire des glacis que ce minéral est forcément néoformé, (surtout au niveau des encroûtements), Ils souligneront par la suite le lien intime existant entre la teneur en calcaire et la croissance de ce minéral.

Dans le Sahara algérien Conrad, (1969) adopte l'hypothèse hybride ou l'influence d'une part d'une nappe superficielle et son rôle dans la formation sous aquatique des croûtes et encroûtement gypso-calcaires nourrissant la genèse de ce minéral et d'autre part sa néoformation pédologique au sien des formations récentes décrite auparavant.

Pour Dutil, (1971) il suppose que dans un sol Saharien soumis à une humidité temporaire en milieu assez perméable, l'attapulgite continue à se former et dans cette ambiance calcimagnésique riche en silicium ou elle se conserve extrêmement bien.

Dans les sols à accumulation gypseuse Dekkich, (1975) estime que le gypse oriente cette néoformation , Boyadjef, (1992) avance à partir d'examen microscopique l'hypothèse selon laquelle seul le gypse sous forme spongieuse serait responsable de la néoformation de ce minéral fibreux.

Dans le désert Saoudien, Viani et al (1983)) estime que la présence de la palygorskrite est d'origine détritique à partir des formations géologiques avoisinantes,

Le transport sous forme de poussière éolienne de l'attapulgite elle a été par ailleurs observé dans l'Erg du Mali par Gausson, (1987) ou la surface poreuse des grains de sable abritent des fine particules de feldspath enrobé par l'attapulgite.

Les conditions du milieu nécessaire a la formation de ce minéral ont été précisés par Weaver et al (1977) in Halitim, (1988) à savoir : une source de silice et d'aluminium, un pH élève et sans excès (entre 8- 9) reflétant une ambiance de confinement ,et finalement une source suffisante de Mg^{++} .

Boyadjev,(1992) avance à partir d'examens microscopiques l'hypothèse selon laquelle seul le gypse sous forme spongieux serait responsable de la néoformation de ce minéral fibreux .

4. COMPORTEMENT PHYSIQUE DES ARGILES DANS UN MILIEU SALE

Le comportement des argiles dans ces milieux est lié à la nature de la composition ionique et sa concentration d'une part et à la structure minéralogique de cette argile d'une autre part (Mc Neal, 1966 in Halitim 1988) les indices de compression et de gonflement d'une même argile dépendent des cations adsorbés :- le Na^+ donne les indices les plus forts, les moyens sont pour le Ca^{++} et les plus faibles sont constatés par le Fe^{+++} et K^+ (Lahrech, 1981).

La nature minéralogique des argiles intervient dans la sensibilité des sols à la dispersion et au gonflement en effet, la dispersion chez la Kaolinite est moins importante que chez la smectite , Ceci peut être attribué au fait que dans cette argile les cations, échangeable sont localisé sur les bords des particules alors que dans les Smectites ils sont localisés partiellement sur les faces ou ils jouent un grand rôle dans la dispersion et le gonflement (Rwanika, 1991).

Le Na^+ échangeable par son pouvoir gonflant et dispersant réduit la macroporosité provoquant ainsi une diminution de la perméabilité en milieu sodique, La pression que provoque les argiles est réorientée vers une direction de moindre résistance se qui diminue la porosité et par conséquence la vitesse d'infiltration qui va engendré plus de susceptibilité à la dégradation et risque d'érosion (Djmai, 1993), Les minéraux instratifiés couramment rencontre des les sols arides ou influencés par la sodicité sont sujet a la formation des croûtes de surface même a un ESP $< 5\%$ (Halitim, 1998) autre aspect de l'influence des cations basiques (Na^+ , K^+ , Mg^{++} , et Ca^{++}) agissent aux interfaces des argiles par la mise en œuvre de cisaillements consécutifs au phénomène de gonflement lors de chaque Rehumectation saisonnière et ainsi à l'individualisation a terme sur le plan macrostructural de structure grossière (Pedro , 1987).

Cependant, il faut bien distinguer les sols salés (riche en sels soluble) ou les argiles se maintiennent foluculées en dépit de leur teneur élevée en sodium échangeable et les sols sodiques ou les argiles sont dispersés, La dispersion se produit généralement avec des cations monovalents et très hydratés comme Na^+ . Par contre la floculation se manifeste avec les solutions concentrées par les cations bi et les trivalent car ils sont fortement liés aux colloïdes en annulant leur charges négatives pour assurer la liaison avec les composants humiques. Ainsi les sols salés ont une structure moins défavorable que les sols à complexe absorbant dominé par les ions Na^+ et à solution faiblement concentrée en sel (Concart, 1967) Toutefois il est nécessaire de préciser que la stabilité structurale d'un sol ne dépend pas seulement des phylosilicates mais aussi des particules minérales associées aux minéraux argileux (Halitim, 1973). La présence du gypse fait accroître la floculation des argiles a cause du Ca^{++} qu'elle renferme, Par ailleurs , son produit de cristallisation grossière ou pulvérulente implique un comportement particulier de la circulation de l'eau (Poch, 1992).

CHAPITRE IV

L'ANALYSE MINÉRALOGIQUE

1-APERÇU SUR LES PRINCIPALES TECHNIQUES UTILISÉES

L'analyse minéralogique a pour objet l'identification et le dosage des minéraux. Son processus analytique est totalement différent de celui de l'analyse chimique et cela résulte du fait que les paramètres qui caractérisent chimiquement les éléments sont difficilement accessibles.

L'analyse chimique qui donne la composition élémentaire des matériaux, ne renseigne pas sur leur modes de combinaison malgré les progrès enregistrés depuis ces dernières années après l'introduction des nouvelles techniques d'investigation.. L'analyse minéralogique nécessite en plus le recours à un ensemble de moyens pour cerner plus ou moins près tels ou tels paramètres spécifique des minéraux.

L'analyse minéralogique ne peut pas être soumise à des règles préfixes ou systématiques d'investigation, Il faut considérer que son aboutissement à la

détermination de la composition en phases minérales implique, dans la plupart des cas le recouplement des résultats obtenus (Robert, 1975).

1.1-LA METHODE CHIMIQUE

L'analyse chimique se voit attribuée la charge de doser avec le maximum possible, la plupart des éléments présent dans les sols silico-alumineux et calcaire à l'exception des éléments à l'état de trace, la compétence de l'analyse consiste dans ce cas à choisir les conditions analytiques, les meilleurs pour aboutir aux résultats recherchés car une imprécision de l'ordre de 0.1 à 0.2 % se répercute de façon considérable dans certains cas cinq à dix fois sur les teneurs en espèces minérales non déterminées directement par voie physique ou physico-chimique (Cailler et Henin, 1963).

Seule une connaissance approfondie de l'ensemble des possibilités analytiques chimique ou physico-chimique actuelles permet de réaliser de telles analyses en laissant de côté toutes préférences pour une technique déterminée, Aussi il faut opérer avec des recouplements pour une détermination donnée, par deux ou trois méthodes surtout si elles sont différentes par leur principe.

.1.2-MESURE DE LA CAPACITE D'ECHANGE DE BASE (CEB)

Les argiles ont la propriété d'absorber d'une façon réversible des cations (H^+ , Na^+ , K^+ , Ba^{++} , NH_4^+) et des dipôles d'eau H-O-H sur leur surface et entre leurs feuillets. L'essai a pour but la mesure de cette capacité d'échange de bases, définie comme étant égal au nombre de milliéquivalent-gramme de cations susceptibles d'être adsorbés d'une façon réversible par 100 grammes de sol.

La mesure se fait en premier par une saturation du matériau avec du baryum (Ba^{++}) qui est facilement échangeable ensuite on le remplace par le cation NH_4^+ ce dernier est

facilement éliminé sous forme de gaz (NH_3) par élévation de température en présence de magnésium, et peut donc être dosé par barbotage dans une solution d'acide sulfurique.

Cette méthode n'est valable que pour les échantillons pure (Vainovitch, 1971).

1.3 - MESURE DE LA SURFACE SPECIFIQUE PAR LA METHODE BET

Cette technique qui a été réalisé en 1938 par les trois physiciens Brunauer , Emmet et Teller consiste à mesurer les quantités de gaz adsorbées sur les minéraux a basse température sous différentes pression, puis appliquer à ces résultats expérimentaux l'équation BET qui régit l'adsorption pulrimoluculaire en partant de considération thermodynamique (Delove , 1968).

La surface spécifique est une indication qui sert surtout à posteriori, Sa valeur ne peut pas intervenir dans l'établissement de la composition minéralogique, mais elle permet, une fois celle-ci obtenue de faire des déductions intéressantes, voir d'obtenir des recoupements précieux pour la confirmation de la composition quantitative.

1.4- L'ANALYSE THERMIQUE

Les méthodes thermiques peuvent apporter une contribution précieuse et parfois complémentaire à d'autres techniques pour la détermination des compositions minéralogiques.

Les analyses thermiques peuvent être classées en deux groupes

1.4.1- L'ANALYSE THERMIQUE DIFFERENTIELLE (ATD)

Analyse qualitative qui consiste à effectuer la mesure de la différence de température t qui se produit entre les substances à étudier et un minéral inerte servant de témoin, lorsque ils sont tous deux soumis à une même loi de chauffe

Cette t est mesurée au moyen de deux thermocouples monté en opposition l'une plongeant dans le matériau de référence, l'autre dans l'échantillon à étudié, un troisième thermocouple placé dans le témoin inerte à température t en occurrence la Kaolin calcinée en raison de son inertie total.

Ces courbes sont enregistrées soit à l'aide d'un enregistrement à suiveur de spot à deux voix, soit au moyen d'une chambre photographique permettant d'obtenir une sensibilité de l'ordre de 0.5 à 1 μ volt par millimètre. Dans le cas des mélanges très complexes et suivant les proportions des constituants, des interférences masquent les résultats et ne permettent pas alors de déceler la présence des minéraux argileux.

1.4.2- L'ANALYSE THERMOGRAVIMETRIQUE ET L'ANALYSE PONDERALES DES GAZ ISSUS DE THERMOLYSE (APGT)

Ce sont des méthodes quantitatives particulièrement appropriées pour la détermination de la teneur en eau (eau d'humidité, eau de constitution des argiles), de la teneur en anhydrite carbonique et en matière organique des matériaux étudiés

(n'exedant pas trois espèces minérales dans le mélange).

La premiers méthode consiste à enregistrer en continu la variation de masse d'eau d'une substance soumise à une loi de chauffer déterminée dans une ambiance donnée, Le système de pesée est constitué par un fléau horizontal à suspension funiculaire,

l'enregistrement se fait suivant le type d'appareil, soit par transmission électromécanique, soit par l'intermédiaire d'un suiveur de spot.

La deuxième méthode est le complément indispensable de l'analyse thermogravimétrique, puisqu'elle permet de vérifier le bilan des phénomènes thermiques en donnant séparément l'eau et le gaz carbonique globale et son origine minéral

.1.5 - SPECTROMETRE INFRAROUGE

Cette méthode apporte des informations qualitatives en identifiant les espèces et l'évolution de leurs structures par un traitement approprié, Chaque espèce argileuse peut être identifiée par son spectre d'absorption caractéristique, L'altération des structures argileuses soumise à un traitement thermique ou chimique se traduit par une évolution dans le spectre infrarouge.

La discrimination des divers types d'argiles coexistant dans un mélange n'est possible que dans certains cas possibles, Ce qui limite son utilisation, La méthode infrarouge peut être retenue pour des analyses de mélange à quatre ou cinq constituants mais son utilisation dans des analyses de soutien n'est pas envisagée. Sans séparation d'étalons, car on ne peut qu'analyser une ou deux argiles direct

1. 6- LA MICROSCOPIE ELECTRONIQUE

Le microscope électronique est un appareil destiné à l'observation des objets minces (quelque centaine d'Anguestrons d'épaisseur au maximum) dont les dimensions latérales n'excèdent pas quelques microns.

Son principe est le même que celui du microscope photonique mais ici pour analyser le pouvoir séparateur, les électrons (accélérés sous une tension voisine de 100 CV) ont été substitués aux rayons ; Ce qui rend de grands services pour reconnaître rapidement certaines espèces argileuses comme les argiles fibreuses (l'attapulgite et sépiolite) ou les hallosites, ainsi que certaines espèces non phylliteux comme la calcite. Par contre si la kaolinite est généralement assez facilement reconnaissable par sa forme quand elle est assez pure, il n'en est pas de même dans un sol ou de surcroît sa teneur est faible, La montmorillonite dont l'aspect floconneux peut se confondre avec celui des illites et des gelées.

C'est pourquoi d'une façon générale, il ne faut attendre de la microscopie électronique des informations absolues sur la composition minéralogique des échantillons, mais sa contribution ne demeure pas moins précieuse.

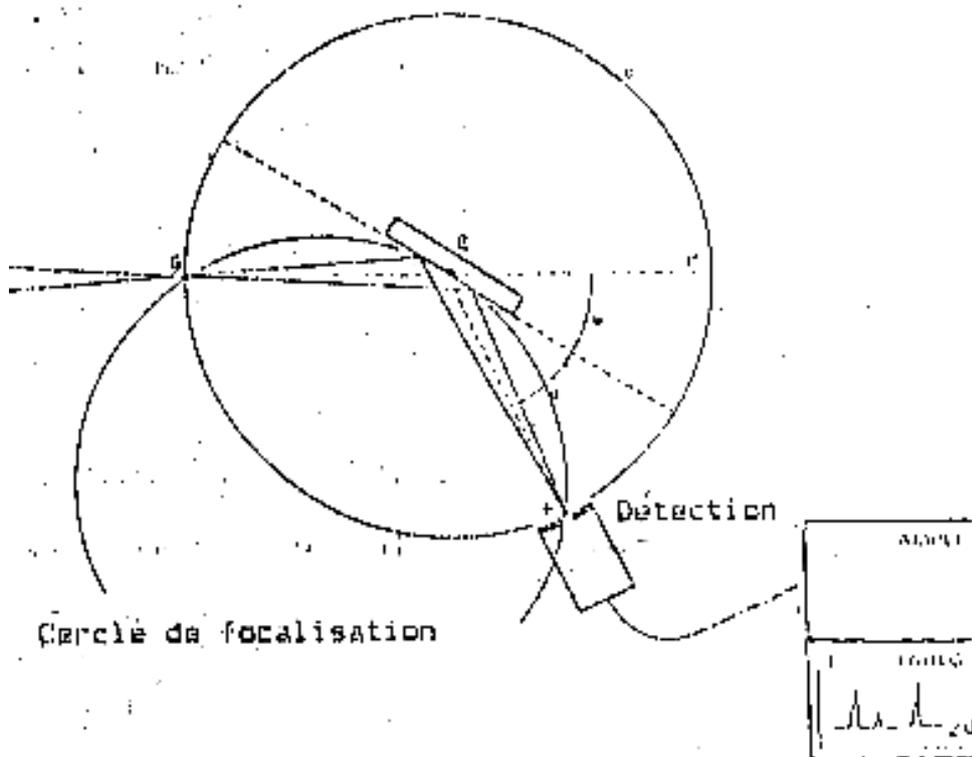
1.7 LA DIFFRACTION DES RAYONS X.

Il existe plusieurs méthodes d'identification des argiles mais c'est à l'utilisation des rayons X que l'on doit les progrès les plus sensibles dans le domaine de l'étude de cette fraction. Par leur très faible longueur d'ondes, les angles permettent de préciser correctement la constitution des minéraux (Caillere et Henin, 1963).

L'utilisation des rayons X ont permis d'accorder à la mesures directe des constantes de la maille et d'aborder la structure interne des minéraux permettant ainsi de mesurer les angles caractéristiques des faces cristallines et de déterminer les systèmes cristallins, et les rapports des paramètres de la maille élémentaire. Ce qui la laisse considérée comme la base de la minéralogie moderne (Aubert et al, 1978).

1.7.1. - PRINCIPE DE LA DIFFRACTION DES RAYONS X

Les rayons X sont des radiations électromagnétiques à très courtes longueurs d'onde ($0.1 < \lambda < 16 \text{ \AA}$, les cristaux qui constituent des réseaux naturels caractéristiques (Intervalles entre plans réticulaires) sont de même ordre de grandeur que la longueur d'onde des rayons X, en conséquence ils sont diffractés par les cristaux comme la lumière l'est par les réseaux et donnent des phénomènes d'interférence identique



(Fig. N° 14 (Vainovitch, 1971

L'utilisation des rayons X en minéralogie est basée sur les phénomènes de diffusion cohérente des rayons X par les couches électroniques des atomes du réseau cristallin,

sans qu'il y ait de changement de longueur d'onde ,C'est ce qu'on appelle le phénomène de diffraction des rayons X (Robert, 1975).

L'intensité du rayonnement diffracté est traduit en courbe par l'intermédiaire d'un potentiomètre enregistreur et s'inscrit sur un papier, on obtient ainsi un diagramme à deux dimensions (Fig. 14).

- Les abscisses fournissent la position angulaire du compteur à un moment donné.
- Les coordonnées indiquant l'intensité du faisceau diffracté donc un élément d'appréciation quantitative du nombre de cristaux fournis par une diffraction et de leur proportion relative dans le mélange . La netteté de l'angle du pic enregistré en fonction de sa base exprime l'état de cristallinité du minérale (Vainovitch, 1971). Cela nous a permis de réaliser une présentation semi-quantitative des minéraux décelés dans la fraction inférieure à 2 microns.

Les conditions de diffraction d'un rayonnement x par une famille de plan réticulaires sont définis par la loi de Bragg.

$$d = \frac{N \lambda}{2 \sin \theta}$$

N : nombre entier désignant l'ordre de réflexion

λ : longueur d'onde du rayonnement X (dans le cas présent notre diffractomètre est équipé d'un tube en cuivre qui correspond a un rayonnement d'une longueur d'onde de $\lambda = 1.542$:

d : distance entre plans réticulaires

θ : l'angle de diffraction

L'intensité des réflexions d'une même famille de plan réticulaire varie avec la constitution de la maille élémentaire et de la nature des constitutions du cristal. Chaque

espace cristallin donne un diagramme de diffraction dont la position et l'intensité correspondent à sa structure cristalline

1.7.2 - PREPARATION DES ECHANTILLONS POUR LA DIFFRACTION

Ils existent deux méthodes d'investigation aux rayons X

- La méthode des poudres de DEBY – SHERER : qui consiste à faire tomber un faisceau parallèle de rayons x monochromatique sur un échantillon composé de très petits cristaux orienté au hasard, où les plans réticulaires de certains de ces cristaux font avec le rayon incident un angle qui satisfait la relation de Bragg (Rebbah, 1993).

Elle est essentiellement utilisée pour une analyse globale, la fraction inférieure à 2 microns est séché, broyé puis portée sur le porte- échantillons exposé au rayons X, Les spectres de rai de tous les minéraux seront donnés, minéraux primaire résiduels, et minéraux secondaires comme les oxydes de fer, sulfates, carbonates et phylossilicates, leur présence révèle le degré de l'évolution de ce sédiment ; s'il y aurait beaucoup de minéraux primaire, l'altération aura été intense et très ancienne. Ces minéraux doivent confirmer par leur apparitions ou leur absences l'étude faite sur les minéraux argileux (Guez, 1984).

- La méthode des agrégats orienté: La tendance à l'orientation préférentielle des argiles due à leur morphologie, peut être avantageusement exploitée les minéraux, ne sont souvent présents dans les sols qu'en faible quantité et ils diffractent plus au moins bien les rayons x suivant le degré de perfection de leur réseaux cristallin (Robert, 1975).

Le premier pas dans l'identification de ces minéraux est d'abord la mise en évidence des divers plans de base. Dans la technique dite des agrégats orienté, l'orientation préférentielle est obtenue par sédimentation, elle se fait parallèlement au plan de base (001) très intense, mais les autres rais disparaissent où sont fortement affaiblies (Rebbah, 1993).

Techniquement, elle consiste à obtenir un dépôt des particules argileuses orientées d'après les plans réticulaires (001) par la sédimentation et l'évaporation de 4ml de suspension aqueuse sur une lame de verre (Vainovitch, 1971).

La disposition des raies secondaires simplifie les diagrammes mais rend malaisée la détermination des minéraux argileux; ceux-ci ont souvent une structure similaire et un minéral peut en masquer un autre. Cependant on peut pallier cet inconvénient en ayant recours à des tests faisant appel aux propriétés physiques et chimiques des divers minéraux.

1.7.3 - TRAITEMENT DES ECHANTILLONS

Ces traitements ont pour but de séparer les minéraux argileux les uns des autres afin de mieux les identifier lors de la détermination des argiles des sols (Guez, 1984). Il sera, en général difficile à l'aide des seuls rayons X, de remonter à la composition cristalochimique. On utilise donc plus généralement des tests de comportement physico-chimique (Robert, 1975) qui sont :

- Fixation de cations échangeable (K^+ , NH_4^+ , Ca^{++} , Mg^{++}) et de liquide à fonction alcool (glycérol, éthylène - glycol). Ces fixations provoquent un écartement ou une attraction plus ou moins grand des feuillets argileux, ceci se traduit sur les diagrammes par le déplacement des raies de base, variable selon les espèces et permet notamment de différencier les minéraux argileux définis précédemment, comme la vermiculite et la chlorite à 14 \AA (Robert et Tessier, 1974).
- Stabilité thermique : le départ de l'eau interfoliaire entraîne dans certains minéraux une contraction de la maille et par conséquent, un déplacement des raies de base.

La structure de la Kaolinite s'effondre à partir de 470°C , Ces chlorites vraies ne sont pas modifiées à 530°C d'où la possibilité d'identifier les chlorites en présence de Kaolinite.

- Résistance aux agents chimiques : les chlorites sont facilement détruites par l'acide chlorhydrique 2 N alors que la Kaolinite n'est que faiblement altérée, les différents traitements sont présentés dans le tableau N°7.

CHAPITRE V

APPLICATIONS DES ARGILES.

1..SUR LE PLAN SCIENTIFIQUES.

.

1.1 VARIATIONS EUSTATIQUES.

Les particules argileuses étant les plus fines des cortèges détritiques, ce sont aussi celles qui sédimentent le plus loin des côtes : En conséquence, les niveaux les plus argileux des séries sédimentaires (de marges passives surtout) signent les épisodes de niveau marin élevé. (Cf. stratigraphie séquentielle).

1.2 RECONSTITUTION DE MILIEUX.

En supposant globalement applicable le principe de l'actualisme, en considérant l'effet de la diagénèse, et d'après ce qui a été dit dans les précédentes parties, l'étude des argiles d'une strate sédimentaire, ou d'un ensemble de strates de même lithologie, peut

donner des informations sur les roches-mères possibles (donc la présence d'un orogène à proximité par exemple), le climat (cf. les paléo-cuirasses latéritiques, ou les bauxites), le type d'altération dominant à l'époque, son intensité ou ses variations d'intensité, l'éloignement entre le bassin sédimentaire et les roches-sources,...

2. DANS L'INDUSTRIE CHIMIQUE

D'autre part, la finesse, et l'état très divisé des argiles, en fait des filtres et des catalyseurs employés dans l'*industrie chimique*. Dans le secteur recherche de la chimie, on cherche aussi à utiliser les argiles pour piéger entre leurs feuillets des substances chimiques, afin de les stabiliser, et d'augmenter le rendements des réactions chimiques, ou d'orienter les molécules afin de privilégier une réaction par rapport à une autre

3. DANS L'EXPLOITATION MINIERE

3.1. LES ARGILES, BARRIERES AUX HYDROCARBURES.

Les compagnies pétrolières, dans leurs prospections, accordent une grande importance à la localisation des bancs argileux dans les séries sédimentaires : en effet, ces couches peuvent correspondre à des roches-mères de pétroles ou de gaz (issues d'une boue riche en matière organique déposée en conditions anoxiques ou hypoxiques), mais, surtout, elles représentent d'excellentes *roches de couverture*, c'est-à-dire des couches imperméables, susceptibles d'avoir stoppé les hydrocarbures lors de leur remontée depuis leur roche-mère sous-jacente, (du fait de leur faible densité). L'imperméabilité des roches argileuses s'explique facilement par la compaction subie lors de la diagénèse, qui aligne les feuillets des minéraux argileux, d'où une forte réduction de la

porosité de la formation. Les particularités des argiles expliquent aussi les critères définis pour les localiser sur les sondages.

3.2. LES BENTONITES, ARGILES POUR BOUE DE FORAGE.

Certaines *smectites*, dénommés *bentonites*, sont employées dans les forages pétroliers pour obtenir, mélangée à l'eau en proportions déterminées, une "boue de forage" de viscosité et de densité précises. Celle-ci a pour rôle d'empêcher la remontée brutale des fluides sous pression présents dans les roches traversées, mais aussi d'évacuer les débris créés par le trépan tout en refroidissant l'outil.

4. INTERETS EN GEO-INGENIERIE ET EN GENIE CIVIL :

4.1. LES ARGILES, MEMBRANES POUR CONTENIR LES POLLUANTS.

Les argiles, les *smectites* (= montmorillonites) en particulier, ont la capacité d'adsorber de nombreux éléments (à la surface de leurs feuillets), du fait de leur grande surface et des charges qu'elles portent (elles peuvent aussi en absorber, s'ils pénètrent à l'intérieur des octaèdres silicatés).

Elles ont ainsi une grande *capacité d'échange cationique* (C.E.C.). On en tire parti pour en faire des pièges à cations polluants, Cuivre, zinc, ou métaux lourds par exemple.

L'imperméabilité des argiles en fait aussi un matériau intéressant pour l'isolement des déchets et le confinement des liquides qui peuvent se former au cours de leur dégradation.

4.2. LES ARGILES, PIEGES AUX COMPOSES RADIOACTIFS

Des argiles, naturelles mais aussi *synthétiques*, peuvent piéger efficacement les composés radiogéniques et radioactifs. Leur emploi comme *agent de confinement* des déchets radioactifs est donc un domaine de recherche actif.>

5. INTERET AGRONOMIQUE: LE COMPLEXE ARGILO-HUMIQUE.

Les argiles sont une part importante des sols où elles contribuent à l'apparition d'une structure complexe, le *complexe argilo-humique*. Il provient de la formation de liaisons électrostatiques entre les minéraux argileux et la matière organique du sol, en particulier les acides humiques, à l'aide, de plus, de cations comme les ions calcium. [Ces ions assurent la floculation des argiles, c'est-à-dire la formation de micelles neutres par association des cations et des feuillets argileux chargés négativement]. Le tout donne au sol une structure grumeleuse, stable et favorable pour l'agronome.

De plus, cette liaison de cations aux argiles en fait aussi un réservoir d'éléments utiles aux plantes, qu'elles leur restituent lentement.

6..MATERIAU DE CONSTRUCTION ET D'OUTILLAGE

6.1 LA CONSTRUCTION ET LES CERAMIQUES.

Du fait des deux premières propriétés décrites ci-dessus, les argiles ont été, dès les premières civilisations, les matériaux de base, en particulier pour la construction (la fameuse tour de Babel, et autres ziggurats du Moyen-Orient, étaient constituées de briques d'argiles), et pour les objets utilitaires. Encore actuellement, l'argile est le

matériau de base pour la création de briques, tuiles, carrelages, céramiques industrielles, robinetteries, porcelaines, faïences, poteries, etc...

6.2.LES ARGILES, COMPOSANTS DU CIMENT

L'argile employée pour la formation de ciment contribue à l'apparition, à chaud, des *silicates d'alumines* (comme au cours de l'évolution métamorphique des argiles), principaux composants du ciment, avec le gypse.

7..LES INDUSTRIES PHARMACEUTIQUES ET COSMETIQUES :

Ils emploient aussi, parfois abondamment, les minéraux argileux. On peut citer par exemple divers traitements cosmétiques de la peau (hydratation de la peau, etc...), ou des "pansements gastriques" constitués de smectites. L'industrie agro-alimentaire utilise aussi des argiles comme agents de texture de certains aliments.

1. QUELQUES AUTRES UTILISATIONS ANCIENNES

Les propriétés absorbantes des "argiles smectiques" sont mises à profit depuis longtemps par les *drapiers* (*terre à foulons*) et les *huileries* (argiles à dégraisser). On peut aussi mentionner, par exemple, la terre de Sommières, une argile commercialisée pour effacer, par absorption, les tâches de graisse sur les textiles.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALLEN, P. A. 1997. *Earth surface processes* (p. 404). Oxford: Blackwell.
- AUBERT G GUILLEMIN C ROLAND P, 1978 : *précis de minéralogie* . Ed Masson ,332p
- BOYADJEF TG, 1974 : Les sols du hodna . PNUD/FAO . Rome rapport technique N°5 . 141p
- .
- BOYADJEF ET SAYEGH.A.H 1992: Forms of evolution of gypsum in arid soils and soil parent materials *Pédologid.* N° XIII-2, pp 171-182 Gent.
- CAILLERE S ET HENIN S, 1963 : La minéralogie des argiles .Ed :Masson et Cie .Paris ,355p..
- GAUSSEN C, 1987 : Observation au MEB de fibres de palygorskyte transportées en grains par le vent . *Micromorphologie du sol* ,686p, pp199-205.
- GUEZ,C 1984 : L'analyse minéralogique des sediments par diffraction de rayons X. *Physio-Géo*, N°3, pp73-84 .
- HALITIM, A 1973 :*Etude expérimentale de l'amélioration des sols sodiques d'Algerie en vue de leur mise en culture* . Thèse doct 3^{ème} cycle ,Uni Rennes,171p
- HALITIM, A 1988 : *Les sols des régions arides de l'Algérie* . Edition OPU. Alger 386p
- HENIN C, 1963 : Classification des minéraux argileux. *C.R .Soc*, N°9 ,pp29-34
- LUCAS J TRAUTH.N, 1965 Etude du comportement des montmorillonites à haute temperatures . *Bull .Serv .Carte géol .Als-lorr* .p217-242 .
- LANGLOIS C .2007 *les argiles genèse et utilisations* . cours ENSA LYON

- MESROUK M, 1980 :** *Contribution à la cartographie des sols de la région de Médéa (Ouled Brahim). Application géochimiques et minéralogiques dans la connaissance de ces sols.* Thèse d'Ing.Agro.80p
- MILLOT , 1964 :** Géologie des argiles . Ed : Masson et Cie, .Paris, 499p.
- PAQUET ET MILLOT 1969 :** Néof ormation de l'attapulгите dans les sols a carapaces calcaires de la basse Moulaya(Maroc oriental). *CR. Acad. Sce . Paris N°268 pp2771-2774*
- PAQUET .H -MILLOT RUELLAN A 1969 :** Néof ormation de l'attapulгите dans les sols a carapaces calcaires de la basse Moulaya (Maroc oriental). *CR. Acad. Sce . Paris n°268 pp2771-2774*
- PEDRO G,1987 :** Géochimie, minéralogie et organisation des sols .Aspects coordonnés des problèmes pédogénétiques. *Cah ORSTOM,sér Pédol.Vol XXIII, N°3,pp169-186 .*
- POCH, RM 1992:** Characterstics of the sand fraction of two hyper-gypsic horizons of Eip La D'urgell (NE Spain) .Egypte .*J Soil.Sc.32,N°4,pp523-535.*
- REBBAH M, 1993 :** *Cours de cristallographie.Technique de diffraction des rayons X et interprétation des diagrammes.* Ed OPU. Algerie ,75p
- REZAK M,1980 :** *Polycopies de minéralogie des constituants .INESA Batna, 83p*
- RIEDER, M. AND CAVAZZINI, G., D'YAKONOV, YU.S., FRANKKAMENETSKII, V.A., GOTTARDI, G., GUGGENHEIM, S., KOVAL', P.V., MU' LLER, G., NEIVA, A.M.R., RADOSLOVICH, E.W., ROBERT, J.-L., SASSI, F.P., TAKEDA, H., WEISS, Z. AND WONES, D.R. (1998)** Nomenclature of the micas. *The Canadian Mineralogist, 36, 905912.*
- ROBERT M ET TESSIER D, 1974 :** Méthodes de préparation des argiles des sols pour étude minéralogique . *Annales Agro.25(6).895p.*
- ROBERT M, 1974 :** Principes de détermination qualitative des minéraux argileux à l'aide des rayons X. Problèmes particuliers posés par les minéraux argileux les plus fréquents dans les sols des régions tempérées .*Ann.Agro N°28, pp303-399*
- ROBERTM, 1975 :** Principe de détermination qualitative des minéraux argileux à l'aide de rayons X . *Annales Agr . (04)pp363-390 .*
- VAINOVITCH, IA1971. :** *L'analyse minralogique des sols argileux .Edition Eyrolles. 95p.*
- VIANI, B. E., LOW, P. F., AND ROTH, C. B., 1983 :** Minéralogie of saudi arabian soils : central alluvial bassins. *Soil.Sci.Am .J:47,pp149-157.*