



MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ «Abbès LAGHROUR» DE KHENCHELA
FACULTÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE



Département Sciences de la matière

N° de série :.....

Mémoire de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme de Master (L.M.D)

Spécialité: Chimie

Option : Chimie de Solide

Intitulé :

**Analyse spectroscopique des quelques
minéraux des régions de Khenchela –
Tebessa- Oum el Bouaghi**

Réalisé par : -AZIZI Yossra
- HADFI Halima

Membres de jury :

Dr. DIREM Amani	MCB	Président
Pr. BOUMAZA Abdecharif	Pr	Rapporteur
Dr. IAICHE Sabrina	MCB	Examineur

Année universitaire :2019/2020

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciement

Tout d'abord, nous rendons grâce à DIEU le puissant de nous avoir donné le savoir et la valonté surtout la patience de réaliser modeste travail.

Nous remerciements de fon du cœur notre encadreur « BOUMAZA CHERIF ».

D'avoir accepté de diriger notre et pour toutes les informations et les conseils qu'il nous a donné.

Nous remerciements a tous les membres du jury qui ont accepté de lire et dévalué ce travail.

On tien à exprimer nos sicéres remerciements ainsi que notre grande reconnaissance à tous ceux que on contribué de prés ou de loin à la réalisation de ce projet de fin d'études et leure exprimer notre gratitude pour l'intérêt et le soutien qu'ils nous ont généreusement

A tous, Merci .

Dédicace

A Dieu avant tout

A mon chère père , qui m'a appris , la persévérance et la patience

A ma chère mère , qui m'a encouragé et soutenu

Que dieu me les garde

A mes adorables sœurs et mon frère

A mon oncle (B) et ma chère tante (J)

A ma chère collègue Halima

A mes amies qui sont toujours près de moi

Dédicace

A Dieu avant tout

A mon chère père , qui m'a appris , la persévérance et la patience

A ma chère mère , qui ma encourager et soutenu

Que dieu me les garde

A mes adarables sœurs et mes frères

A ma chère collègue yossra

A mes amies qui sont toujours prés de mo

LISTE DES TABLEAUX :

TAB I	1 : Les neuf classes des minéraux
TAB I	2 : Propriétés du gypse de l'anhydrite
TAB II	1 : Gamme spectrales electromagnétiques
TAB II	2 : Gammes infrarouges
TAB II	3 : Les diverses vibration internes
TAB II	4 : Indexation des divers modes obtenus sur le spectre de gypse
TAB II	5 : Divers changements du gypse en fonction de la température
TAB II	6 : Indexation du spectre FTIR de la baryte
TAB II	7 : Indexation des divers modes obtenus sur le spectre de la dolomite
TAB II	8 : Indexation des divers modes obtenus sur le spectre de quartz

TABLE DES MATIERES	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Table des matières	
Introduction	2
Chapitre I :	
I _1. Généralité sur les matériaux.....	5
2. Les matériaux.....	5
3. Classement des matériaux.....	7
4. Les minéraux	9
5. Caractéristique des minéraux	9
6. Classification des minéraux.....	9
II _ Les sulfates	
1. Définition	12
2. Présence des sulfates dans l'environnement	13
3. Comment le sulfate se retrouve présent dans l'eau ?.....	14
4. La barytine	14
5. La célestite ou Célestine	15
6. L'anhydrite	15
7. Le gypse	16
8. L'epsomite	18
III _ Les carbonates.....	
1. Définition	18
IV _ Les nitrates	19
1. Les hydroxydes et oxydes.....	
1-1. Hydroxydes.....	20
1-2. Les oxydes	21
Chapitre II :	
I _1. Introduction.....	23
2. Rappel théorique	24

2-1. Les rayonnements électromagnétiques.....	24
2-2. Définition, L'infrarouge.....	25
3. Théorie de la spectroscopie Infrarouge	25
4. Vibration d'une molécule poly atomique	26
5. Spectre FTIR et mode de vibrations de H ₂ O.....	27
6. Les modes de vibration des carbonates.....	29
7. Les modes de vibrations de baryte	31
8. Les modes de vibrations de Quartz	31
II _ Mode opératoire et accessoires de spectroscopie FTIR	31
III _ Partie expérimentale.....	
1. Le Gypse (images optiques, et spectres FTIR).....	37
2. La Baryte (images optiques, et spectres FTIR).....	46
3. La Dolomite (images optiques, et spectres FTIR).....	52
4. La Quartz (images optiques, et spectres FTIR).....	57
5. L'oxyde d'antimoine (images optiques, et spectres FTIR).....	61
Chapitre III:	66
Discussion des résultats.....	66
Synthèse des résultats FTIR.....	66
Duretés Mohs, et masses molaires des minéraux étudiés	68
Températures de fusion, et densités des minéraux objets de notre travail.....	69
Prix de vente de la tonne de chacun des minéraux étudiés.....	69
Production mondiale, et consommation de minéraux étudiés	70
IV _ CONCLUSION	73
Annexe	
Références bibliographiques	
Résumé	

.....

Liste des figures

Figure I-1	Les quatre grandes familles de matériaux.
-------------------	---

Figures du chapitre II

Figure II-1	types d'infrarouges allant du proche infrarouge à l'infrarouge lointain [2].
Figure II-2	(a) Modèle simple de la molécule HCl, (b) Courbe de l'énergie potentiel en relation avec la distance interatomique- La fonction Morse (énergie potentielle de l'oscillateur anharmonique), et (c) L'énergie potentielle selon le modèle d'ascension harmonique.
Figures II-3	Spectre Infrarouge à transformée de Fourier de l'eau.
Figure II-4	divers types de vibrations dans la molécule d'eau [9].
Figure II-5	Exemple de background enregistré préalablement à l'analyse FTIR. [11].
Figure II-6	accessoires pour préparation de pastille KBr.
Figure II-7	Presse hydraulique.
Figure III-8	Exemple de pastilles.
Figure II-9	Spectromètre FTIR.
Figure II-10	Porte échantillon placé dans le spectromètre ftir.
Figure II-11	(a), (b), (c) Photographies d'un minéral, et (d) et (e) les spectres FTIR indiquant la présence de dolomite et de quartz dans cette pierre.
Figure II-12	(a), (b), (c) et (d) Photographies d'un minéral, et (e) le spectre FTIR correspondant et indiquant la présence de CaSO ₄ +2H ₂ O ainsi qu'une faible quantité de dolomite dans cette pierre.
Figure II-13	(a), (b) Photographies d'un minéral, et (d) le spectre FTIR correspondant et indiquant la présence majoritaire de la baryte ainsi qu'une faible quantité de dolomite (1420 cm ⁻¹) dans cette pierre.
Figure II-14	(a), (b) Photographies d'un minéral, et (d, e) le spectre FTIR correspondant et indiquant la présence majoritaire de la baryte dans cette pierre.
Figure II-15	(a), (b) Photographies d'un minéral, et (c, d) le spectre FTIR correspondant et indiquant la présence majoritaire de la dolomite avec

	présence minoritaire de baryte dans cette partie.
Figure II-16	(a), (b) Photographies d'un minéral, et (c) le spectre FTIR correspondant et indiquant la présence majoritaire de baryte avec présence minoritaire de la dolomite dans cette partie.
Figure II-17	(a), (b) Photographies d'un minéral, et (c) le spectre FTIR correspondant et indiquant la présence majoritaire de la dolomite avec présence minoritaire de la baryte dans cette partie.
Figure II-18	(a), (b), (c) Photographies d'un minéral, (d) le spectre FTIR correspondant et indiquant la présence majoritaire de la baryte, et (e) spectre ftir correspondant à la partie jaune dans la pierre.
Figure II-19	(a) et (b) Photographie d'une pierre, et (c) et (d) analyse ftir de la partie verdâtre correspondante confirmant que celle-ci est majoritairement malachite.
Figure II-20	(a) et (b) Photographies d'une pierre, et (c) et (d) les analyses ftir correspondantes confirmant la présence de quartz et dolomite.
Figure II-21	Photographies de pierre, et analyses ftir correspondantes indiquant la présence de dolomite et une moins importante quantité de baryte.
Figure II-22	(a), (d) Photographies de pierre d'Ain Mimoun, (c) spectre partie sombre (SiO ₂ +Dolomite), partie brillante (bicarbonates), partie blanche (baryte), partie sable (baryte+dolomite).
Figure II-23	Image et spectre ftir du minéral (Baryte + dolomite).
Figure II-24	Images et spectres ftir de la galène.
Figure II-25	Images et spectres ftir de la galène.
Figure II-26	Exemples de minéraux d'Ichmoul.
Figure II-27	Spectres ftir de minéraux d'Ichmoul.

Figures du chapitre III

Figure 1-III	Spectres FTIR des échantillons objets de notre travail [dans la partie 4000-400 cm ⁻¹].
Figure 2-III	Spectres FTIR des échantillons objets de notre travail [dans la partie dite finger print].
Figure 3-III	Les valeurs des duretés, et des masses molaires des minéraux étudiés.
Figure 4-III	Les valeurs des températures de fusion, et des densités des minéraux étudiés.
Figure 5-III	Les prix par tonne des minéraux étudiés.
Figure 6-III	les données des productions mondiales des minéraux étudiés.



INTRODUCTION

Introduction générale

Notre pays l'Algérie est riche en ressources naturelles de grande qualité, et d'importantes potentialités. En plus des espaces très vastes (2,382 millions km²), la diversité des paysages est aussi à noter. On passe donc des cotes maritimes (1 622 km), aux plaines et montagnes (Aurès, Atlas, Djurdjura, Hoggar, Tassili, Eddough, Mont Ouled Nail,...), pour aller au Sahara. Ces espaces imposants abritent une très grande diversité de faune, et de flore. Dans le cas des mines, il existe nettement des gisements concentrés (par exemple des filons) et des ressources très riches qui, si elles étaient exploitées, placent l'Algérie en pole position dans le monde et lui confèrent une place légitime parmi les premiers (Chine, EU, Brésil, Russie, Inde, Afrique du Sud) où figurent les futurs maîtres du monde. Le potentiel de certains minéraux place l'Algérie dans les 10 premiers pays en termes de réserves. La géologie du pays et sa proximité aux marchés européens sont propices [1-2]. Mais atteindre ce niveau nécessite également un essentiel encore plus important, celui de la formation des hommes (scientifiques, cadres gestionnaires, ...), et la création d'entreprises mondialement concurrentielles de haut niveau.

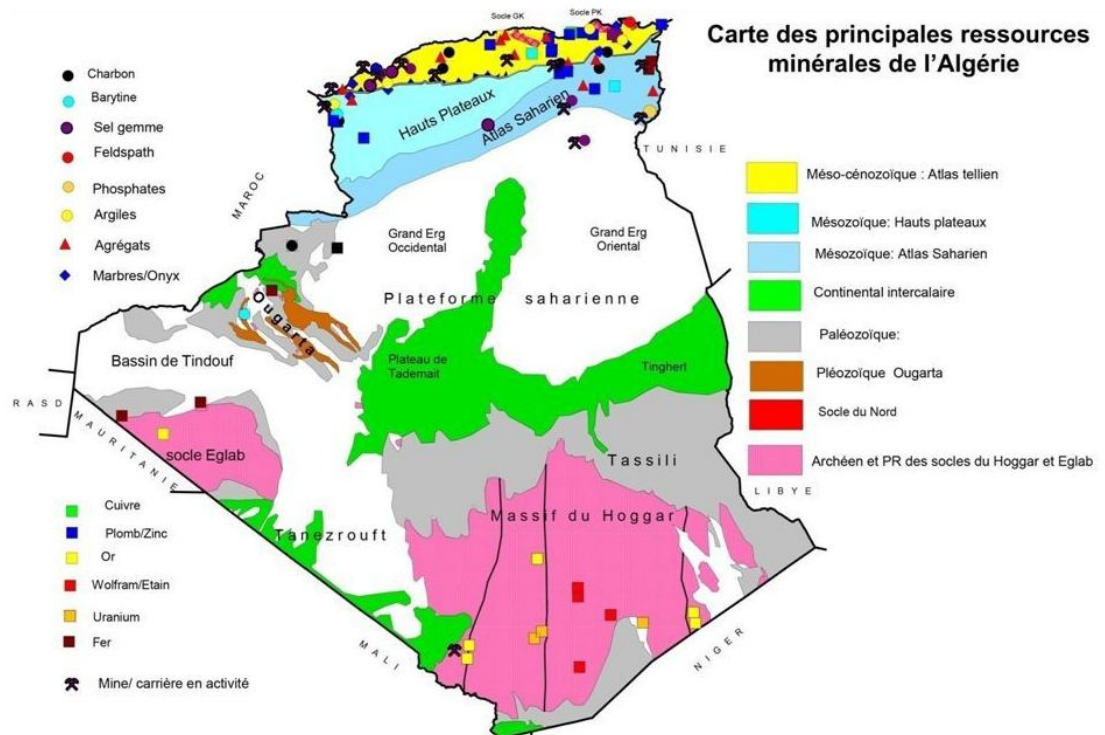
L'Algérie possède entre autre : Hydrocarbures conventionnels (L'Algérie se classe au quinzième rang mondial et au troisième en Afrique avec 9,2 milliards de barils de pétrole et des réserves prouvées de 0,9 % du total mondial.) [2], Hydrocarbures non conventionnels de roches-mères (gaz et huile de schistes), l' Hélium : les réserves=3 Gm³, 3ème du monde, Le lithium est un élément majeur dans les nouvelles énergies à la fois pour les stocker (batteries) que comme carburant dans la fusion nucléaire qui est promise à supplanter toutes les autres énergies dans un avenir à moyen terme, Le Béryllium, le Charbon, Sel gemme (Na Cl), Sel de potasse (KCl), la Baryte (~ 6x10⁶ t), la bentonite, Kaolinite, Feldspath, Agrégats, Argiles, Marbres, les Sels de strontium (SrSO₄ et SrCO₃), le Manganèse : Métal classé stratégique aux USA, l' Arsenic, Le fer existe en quantité considérable au Sahara, le titane, Polymétaux (cuivre, plomb, zinc), les Terres rares, l' Or, le Wolfram (ou tungstène)-étain, Uranium, Chrome, Thorium : C'est un métal qui remplacera l'uranium dans les centrales atomiques. Cet inventaire ne se veut pas exhaustif. D'autres métaux et substances utiles peuvent encore être cités. Il est simplement destiné à donner un aperçu des richesses du sous-sol algérien, mais rappelons-le la principale est humaine et repose sur l'acquisition des connaissances dans les écoles et les universités, et l'éducation [1].

Introduction

Notre travail est présenté en deux chapitres, le premier donne des généralités sur les minéraux, et le second chapitre qui est le plus consistant présente la partie expérimentale de nos travaux.

Dans cette optique nous avons choisis de nous intéresser à quelques minéraux de l'est-Algérien, que nous avons voulu signaler, et ensuite analysés afin de connaître leur potentiel en élément de base. Ces minéraux sont répartis dans les wilayas de Khenchela, d'Oum El Bouaghi, et de Tebessa. Il s'agit du Gypse, de la baryte, de la dolomite, du quartz, et de l'oxyde d'antimoine.

Les minéraux collectés, ont été photographiés, analysés par spectroscopie FTIR, et nous avons aussi rajouté les données cristallographiques les concernant.



Carte de l'Algérie relatant les richesses minitères

[3-4-5-6-7-8]



CHAPITRE I

Chapitre I

I -1. Généralités sur les matériaux

Les matériaux sont à la source de la technologie et du monde industriel. La réussite technique et un succès commercial d'un produit fabriqué dépendent en grande partie du ou des matériaux choisis.

Sélectionner un matériau n'est généralement pas une opération simple compte tenu de la grande variété proposée. Le choix dépend autant du prix que des qualités propres du matériau et du procédé de fabrication retenu pour la réalisation. La sélection est le plus effectuée en équipe, client et concepteur étant associés aux techniciens de fabrication. [01]

2. Les matériaux :

Un matériau est une matière d'origine naturelle ou artificielle que l'homme façonne pour en faire des objets. C'est donc une matière de base sélectionnée en raison de propriétés particulières et mise en œuvre en vue d'un usage spécifique. La nature chimique, la forme physique (phases en présence, granulométrie et forme des particules, par exemple), l'état de surface des différentes matières premières, qui sont à la base des matériaux, leur confèrent des propriétés particulières. On distingue ainsi quatre grandes familles de matériaux : [02]

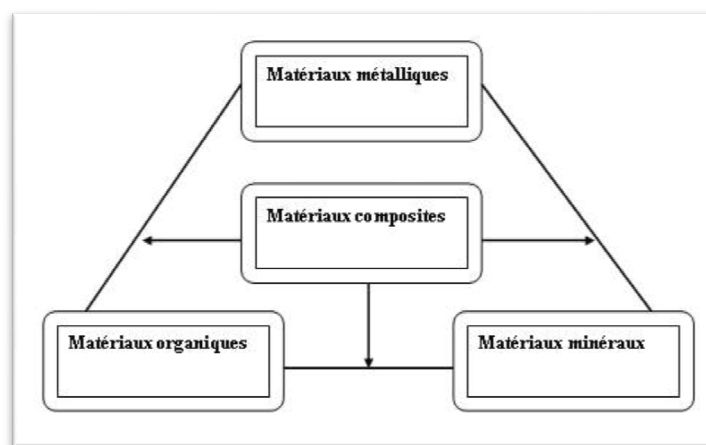


Figure I : Les quatre grandes familles de matériaux. [2]

Les grandes classes de matériaux. Les matériaux minéraux sont des roches, des céramiques ou Des verres. Les matériaux métalliques sont des métaux ou des alliages de métaux.

En science des matériaux, par exemple, « **matériau** » est un terme générique employé dans le sens de matière, substance, produit, solide, corps, structure, liquide, fluide,

Chapitre I

échantillon, éprouvette, etc. Exemples : eau, air, sable (dans des tableaux de caractéristiques) ; un matériau viscoélastique est souvent qualifié de fluide à mémoire.

La classification de matériaux en solides, liquides, semi-solides, etc. est primitive et parfois non valable. En effet, en rhéologie, il est possible d'observer un comportement de type liquide dans un matériau solide et un comportement de type solide dans un matériau liquide (viscoélasticité, seuil d'écoulement).

Voici quelques exemples de matériaux :

- Cuir
- Bois
- Liège (pour isolation de machines, ...)
- papier, carton
- chaux
- sable
- verre, céramique
- matière plastique
- polymère, plexiglas
- Elastomère
- Métal, alliage, acier
- Matériau composite, béton
- Pierre
- brique
- Carreaux de plâtre
- Pigment
- Médicament
- Minéral
- Matière grasse
- Cire
- Explosif

Chapitre I

3. Le classement des matériaux en conception :

- On recense environ 80 000 matériaux utilisés en constructions diverses et, pour mieux se repérer, les matériaux sont souvent regroupés en six à huit familles (selon les références) :
- céramiques (SiC, Al₂O₃, ZrO₂, diamant, ciment, béton, etc.) :
- métaux ferreux (aciers fortement et faiblement alliés, fontes) ;
- métaux non-ferreux (alliages d'aluminium, de cuivre, de nickel, de titane, de zinc, etc.) :
- polymères thermoplastiques ;
- Polymères thermodurcissables :
- Elastomères et mousses (silicone, EPDM, caoutchouc niryile (NBR), polyuréthane, etc.) :
- verres ;
- composites, naturels (bois), fabriqués (bois aggloméré, contreplaqué, stratifié).

Pour des besoins de distinction des propriétés spécifiques et/ou d'une garantie sur ces propriétés, certaines références distinguent les céramiques poreuses (béton, briques), les polymères techniques (PMMA)..., ou même la destination de leur usage (normes américaines AISI, ASTM, internationales ISO, européennes EN, etc.), ou encore la performance qu'apporte le matériau à la fonction souhaitée.

Pour éviter une distinction en classes et en sous-classes moyennement fructueuse (car redondantes entre les systèmes), des outils de sélection des matériaux (CES3 de Cambridge, Fuzzy Mat de Grenoble...) ont été élaborés. Ils permettent d'intégrer aisément les nouvelles avancées de la recherche en nanomatériaux et d'intégrer leurs propriétés physiques (microscopiques) tout à fait particulières ainsi que leur condition de transformation. Ils permettent d'intégrer la contrainte (ou fonction) environnementale d'une manière dynamique plutôt que réglementaire. [02]

3.1. Le classement des matériaux pour le calcul :

En général, on différencie les matériaux ductiles des matériaux fragiles, et un grand nombre de lois bien connues de la mécanique s'appliquent. Le cas des polymères est un cas à part, car à température ambiante, on peut avoir différents états de la matière et donc différentes lois applicables selon la nature du polymère. En effet, à température ambiante ou à quelques dizaines de degrés Celsius, on peut rencontrer l'état fondu, caoutchouteux, la transition vitreuse, l'état vitreux ou semi-cristallin. Ce n'est pas le cas des métaux qui sont

Chapitre I

plutôt stables à quelques centaines de degrés près. Pour étudier avec suffisamment de certitude la bonne utilisation d'un polymère, on considère tout d'abord les deux grandes catégories, où les élastomères sont inclus :

- thermodurcissables (noté TD) : obtenus par réaction de polymérisation, en général irréversible, donc non-recyclables (insolubles et infusibles) ;
- thermoplastiques (noté TP) : classés en quatre catégories (du moins cher au plus cher) :
 - polymères de grande diffusion : polyéthylène (PE), polypropylène (PP), polychlorure de vinyle (PVC), polystyrène (PS), polyéthylène téréphtalate (PET),
 - polymères intermédiaires : polyacrylonitrile (PAN), polybutadiène (BR), acrylonitrile butadiène styrène (ABS), polyméthacrylate de méthyle (PMMA), acétate de cellulose (CA),
 - polymères techniques : polyamide (PA), polycarbonate (PC), poly(oxyde de phénylène) (PPO),
 - polymères de spécialité :
 - polysulfure : polysulfone (PSU),
 - fluoropolymères : polyfluorure de vinylidène (PVDF), Téflon (PTFE),
 - silicones.

Pour une utilisation technique (calcul et caractéristiques physiques), on classe les polymères selon les caractéristiques de leurs monomères (molécules primaires du polymère) :

- semi-cristallins (50 % de la production) : polyoléfine (PE, PP, ...), polyester, polyamide (PA), polyuréthane (PUR), fluoropolymère (PTFE, PCTFE, PVDF, etc.) ;
- amorphes : polymère chloré (PVC), cellulosique (acétate de cellulose, acétobutyrate de cellulose), silicone, polyacrylique (PMMA, PAN), styrénique (SAN, SBR, ABS), polycarbonate (PC) ;
- élastomères : polyisobutylène (PIB, caoutchouc butyle), styrène-butadiène (SBR), caoutchouc nitrile (NBR), Néoprène (polychloroprène), éthylène-propylène (EPR), silicone, polyphosphazène ;
- thermodurs (utilisation en dessous de la température de transition vitreuse) : phénoplaste, aminoplaste, polyester insaturé (UP), polyépoxyde (EP), polyuréthane (PUR), polyimide (PI), silicone.

Cette classification peut paraître complexe, mais les distinctions à l'échelle microscopiques sont les suivantes :

Chapitre I

- amorphe (ou fondu) : les chaînes de polymère reposent les unes sur les autres et leur distribution est statistique (gaussienne) ;
 - élastomère (ou gel) : les chaînes possèdent des points de réticulation (liaisons covalentes, fortes) ;
 - thermodurs : les chaînes sont constituées de molécules tri- ou tétra- fonctionnelles (liaisons fortes sur 3 axes) ;
 - semi-cristallins : des fragments de chaînes sont cristallisés, d'autres sont amorphes.
- [02]

4. Les Minéraux :

La Terre est constituée de roches, les roches sont formées de minéraux et les minéraux sont constitués d'un ou plusieurs éléments chimiques. Ainsi, le granite est une roche composée de trois minéraux principaux : quartz, feldspaths et micas. Le quartz est un minéral de formule chimique SiO_2 : il est composé de silicium et d'oxygène. [03]

4.1. Définition d'un minéral :

Un minéral est un solide naturel, homogène, possédant une composition chimique définie et une structure atomique ordonnée. La structure atomique ordonnée veut dire que tous les minéraux sont des cristaux : c'est-à-dire des solides possédant une forme polyédrique limitée par des faces planes (dans le cas où la formation du cristal n'a pas été perturbée par des agents externes). La science qui s'occupe de l'étude des minéraux est : la minéralogie.

Exemple : l'eau liquide n'est pas un minéral, mais la glace d'eau qui est solide, naturelle, homogène, possédant une composition chimique définie (H_2O) et une structure atomique ordonnée (la glace d'eau est cristallisée) est un minéral. [03]

5. Qu'est-ce qu'un minéral ?

C'est un corps solide, naturel, homogène, inorganique, stable dans une température de chambre et qui se caractérise par :

- Une composition chimique bien définie ;
- Une structure cristalline (structure interne régulière). [04]

6. Classes des minéraux :

Nous connaissons environ 3000 espèces minérales, et chaque année voit la découverte de nouveaux minéraux. De plus, il existe plusieurs milliers de variétés. Il n'est guère possible de saisir un nombre si important de minéraux dans son ensemble, et il s'avère nécessaire de les classer, c'est-à-dire de les grouper selon des propriétés identiques ou proches.

Chapitre I

Pour cela, différentes possibilités sont offertes. Les minéraux peuvent être groupés d'après leur mode de formation, leur répartition dans les roches, ou encore selon des caractéristiques extérieures comme la forme cristalline, la dureté, l'éclat ou la densité. La pertinence de ces diverses classifications se détermine en fonction des objectifs poursuivis.

En minéralogie, les minéraux sont habituellement classés d'après leur composition chimique, et dans un deuxième temps, d'après leur structure. Lorsqu'on parle aujourd'hui de « système minéralogique » en milieu scientifique, on entend toujours par là une classification basée sur la composition chimique. Ce type de classification comporte également plusieurs modèles avec différents modes de groupement des minéraux, mais en minéralogie, une classification en neuf classes de minéraux s'est imposée.

Pour les non-spécialistes et pour la plupart de ceux qui exercent un métier en relation avec les roches (comme les tailleurs de pierres, les sculpteurs et les professionnels de la construction), le système chimique de classification des minéraux n'est généralement pas acceptable. C'est pourquoi, dans ce livre, les minéraux sont présentés tels que le non-spécialiste les perçoit au mieux, c'est-à-dire, comme constituants des roches, comme minerais et comme gemmes. Ce genre de classification rendant inévitable des recouvrements dans la présentation des minéraux, des compromis dans les grandes lignes se sont révélés nécessaires. Nous nous y sommes consciemment résolus.

Le tableau ci-dessous est destiné aux collectionneurs classant leurs minéraux d'après le système scientifique. Les illustrations et textes s'y rapportant sont indiqués dans l'index se trouvant à la fin du livre. [05]

6-1.Système minéralogique scientifique :

Les minéraux sont groupés en neuf classes. La dernière comprend des composés organiques ressemblant à des minéraux. [05] le tableau suivant I :

Ve classe	Eléments
2 ^e classe	Sulfures et sulfosels
3 ^e classe	Halogénures
4 ^e classe	Oxydes et Hydroxydes
5 ^e classe	Nitrates carbonates, borates
6 ^e classe	Sulfates, chromates, molybdates, tungstates
7 ^e classe	Phosphates, arséniates, vanadates

Chapitre I

8 ^e classe	Silicates(nésosilicates,sorosilicates, cyclosilicates,inosilicates,phyllosilicates, tectosilicates .
9 ^e classe	composés organiques

Minéraux (sélection) groupés selon le schéma de classification scientifique :

- 1^{re} classe : éléments

Amalgame, antimoine, arsenic, diamant, or, graphite, cuivre, platine, mercure, soufre, argent, tellure, bismuth.

-2^e classe : sulfures et sulfosels

Acanthite, antimonite, argentite, arsénopyrite, orpiment, berthiérite, galène, bornite, boulangérite, bournonite, chloanthite, covelline, cubanite, énargite, freibergite, gersdorffite, jamesonite, jordanite, cobaltite, chalcosine, chalcopyrite, linnéite, Iblingite, pyrrhotine, marcassite, millé-rite, molybdénite, nickéline, patronite, pentlandite, petzite, polybasite, proustite, pyrargyrite, pyrite, réalgar, safflorite, matildite, schwazite, sperrylite, skuttérodite, stannine, stéphanite, stibiopalladinite, sylvanite, tennantite, tétraédrite, bismuthine, wurtzite, sphalérite, cinabre.

-3^e classe : halogénures

Atacamite, carnallite, chlorargyrite, fluorite, halite, calomel, cryolite, salmiac, sylvine.

-4^e classe : oxydes et hydroxydes

Alumogel, anatase, arsénolite, asbolane, bismite, bixbyite, boehmite, brannérite, braunite, brookite, chromite, chrysobéryl, coesite, columbite, coronadite, cristobalite, cuprite, diaspore, glace, franklinite, gahnite, gibbsite, goethite, hématite, hausmannite, hétérogénite, hollandite, ilménite, cassitérite, corindon, cryptomélane, lépidocrocite, magnétite, manganite, molybdite, niobite, opale, pechblende, pérowzskite, psilomélane, pyrochlore, pyrolusite, quartz, rutile, sassoline, senarmontite, spinelle, stishovite, tantalite, ténorite, thorianite, tridymite, uraninite, valentinite, wolframite, zincite.

-5^e classe : nitrates, carbonates, borates

Ankérite, aragonite, aurichalcite, boracite, azurite, bismuthite, borax, calcite, cérusite, colémanite, dolomite, gaylussite, hambergite, hydrozincite, kernite, kurnakovite, leadhillite, magnésite, malachite, nitronatrite, phosgénite, rhodochrosite, salpêtre, sidérite, sinhalite, smithsonite, soda, strontianite, ulexite, withérite.

-6^e classe : sulfates, chromâtes, molybdates, tungstates

Chapitre I

Alunite, anglésite, anhydrite, barytine, brochantite, chalcantite, célestine, épsomite, gypse, halotrichite, jarosite, kainite, kiesérite, crocoïte, linarite, polyhalite, powellite, scheelite, picromérite, thénardite, wulfénite.

7e classe : phosphates, arséniates, vanadates

Adamite, amblygonite, annabergite, apatite, autunite, béryllonite, brasilianite, cacoxène, carnotite, descloizite, érythrine, lazulite, mimétésite, monazite, mottramite, olivénite, pharmacolite, purpurite, pyromorphite, scholzite, stolzite, strengite, torbernite, turquoise, uranocircite, vanadinite, variscite, vivianite, wardite, wavellite.

8e classe : silicates

Aegirine, actinote, allanite, analcime, andalousite, anthophyllite, apophyllite, arfvedsonite, augite, axinite, bénitoïte, bertrandite, béryl, bronzite, cancrinite, chabasite, chamosite, chlorite, chrysocole, cordiérite, danburite, daphnite, datolite, delessite, diopside, diopase, dumortierite, enstatite, épidote, euclase, fassaïte, fayalite, groupe des feldspaths, forstérite, garniérite, glaucophane, groupe des micas, groupe des grenats, gyrolite, harmotome, haüyne, hédénbergite, hémimorphite, heulandite, hornblende, hypersthène, illite, ilvaïte, jadéite, kaliophilite, kaolinite, clinochlore, kornéropine, cyanite, lapislazuli, laumontite, leucite, mélilite, mésolite, milarite, montmorillonite, natrolite, néphéline, neptunite, noséane, okénite, olivine, omphacite, pectolithe, pennine, pétalite, phénacite, phillipsite, piémontite, préhnite, pyrophyllite, ripidolite, rhodonite, riébeckite, sépiolite, serpentine, sillimanite, skapolite, scolécite, sodalite, spodumène, staurotide, stilbite, talc, thomsonite, thorite, thuringite, titanite, topaze, trémolite, tourmaline, uranotile, vésuvianite, willemite, wollastonite, zoïsite, zirkon.

9e classe : composés organiques

Ambre, mellite, ozocérite, whewellite. [05]

II - Les Sulfates

1. Définition :

Les sulfates sont les sels de l'acide sulfurique. Dans la nature, le groupe des sulfates compte de nombreuses espèces minéralogiques (plus de 200), parmi lesquelles un peu plus d'une vingtaine dont le tableau donne les principales caractéristiques ont une réelle importance géologique ou économique. Des considérations d'ordre physique et surtout cristallographique ont conduit à réunir le groupe des sulfates et les groupes des chromates, molybdates et tungstates dans une classe minéralogique unique. Dans ces minéraux, les anions forment des tétraèdres plus ou moins réguliers ; l'un des plans de symétrie des tétraèdres SO_4^{2-} (contenant le soufre et deux des oxygènes) peut également contenir le cation,

Chapitre I

ce qui confère à la plupart des sulfates anhydres une symétrie orthorhombique ; la symétrie devient généralement monoclinique dans les sulfates contenant des molécules d'eau. Les sulfates naturels se forment dans des conditions variées : par condensation de fumerolles volcaniques, ils participent à la genèse des sublimés ; par altération des minerais sulfurés, ils apparaissent dans la zone d'oxydation des gîtes métallifères ; par précipitation directe, ils constituent une bonne part des gangues hydrothermales et des séries sédimentaires à « évaporites ». [6]

2. Présence des sulfates dans l'environnement

Les sulfates de sodium, de potassium et de magnésium sont tous hydrosolubles, alors que les sulfates de calcium, de baryum et des métaux lourds ne le sont pas. Les sulfates dissous peuvent être réduits en sulfures, qui se volatilisent dans l'air sous forme de sulfure d'hydrogène, ou sont précipités sous forme d'un sel insoluble ou incorporés dans les organismes vivants.[7]

Des sulfates sont rejetés dans l'environnement aquatique avec les déchets des industries qui emploient des sulfates et de l'acide sulfurique, comme les industries minières et les fonderies, les usines de papeterie kraft, les usines textiles et les tanneries. Le dioxyde de soufre (SO_2) atmosphérique, formé par la combustion des carburants fossiles et les procédés de grillage utilisés en métallurgie, peut aussi contribuer à la teneur en sulfates des eaux de surface. On a souvent noté une corrélation entre les teneurs en sulfates des eaux de surface et les teneurs en dioxyde de soufre des émissions d'origine anthropique. Par exemple, dans la région de Sudbury, en Ontario, on a trouvé que des changements de la qualité de l'eau, comme l'augmentation de son pH et la diminution des teneurs en sulfates, en nickel et en cuivre, ont coïncidé avec la réduction des émissions de dioxyde de soufre par les fonderies de Sudbury.[7-8-9]

Le trioxyde de soufre (SO_3), produit par oxydation photo lytique ou catalytique du dioxyde de soufre, se combine aux vapeurs d'eau en donnant de l'acide sulfurique dilué, qui retombe en «pluie acide» ou en «neige acide». [7] Au Canada, la teneur des pluies en sulfates variait de 1,0 à 3,8 mg/L en 1980,[10] alors que l'on avait mesuré auparavant à Toronto des concentrations allant de 3 à 7 mg/L.[11] Les retombées de sulfates mesurées dans le manteau nival (mars) et les pluies (en mars et en avril) dans le région d'Algoma, en Ontario, montrent des teneurs respectives de 7,81 et de 11,01 meq/m². [12]

La teneur en sulfates caractéristique des lacs canadiens va de 3 à 30 mg/L.[13] Des données récentes recueillies en Ontario montrent des teneurs semblables dans de petits lacs

Chapitre I

($12,7 \pm 11,3$ mg/L); la concentration de sulfates était de 7,6 mg/L dans le lac Supérieur à Thunder Bay et de 19 mg/L dans le lac Huron à Goderich.[14] Lors d'un relevé des eaux fluviales naturelles fait dans l'Ouest du Canada, la concentration de sulfates variait de 1 à 3 040 mg/L; la plupart du temps, elle était inférieure à 580 mg/L.[10-11-12-13-14-15]

3. Comment le sulfate se retrouve présent dans l'eau ?

Les sulfates se reconnaissent aisément dans les eaux par la propriété qu'ils leur communiquent de donner avec le muriate de baryte un précipité blanc insoluble dans l'acide nitrique, Les sulfates de soude, de chaux et de magnésie sont communs ; celui de fer l'est davantage, celui d'alumine l'est plus encore. M.Vauquelin a trouvé le sulfate de manganèse dans la source de Cransac. On dit que le sulfate de strontiane se trouve dans l'eau de Louesche.[16]

4. La barytine :

Sulfate de baryum (BaSO_4) cristallisé dans le système orthorhombique. Les cristaux s'assemblent fréquemment en masses lamellaires, par suite du développement de la face (001) ; les cristaux prismatiques sont beaucoup plus rares. Le plus souvent, ce sont des amas granulaires, cryptocristallins. On connaît également des concrétions sphériques et ellipsoïdales à structure fibroradiée ou à structure zonée. Les cristaux sont quelques fois incolores et transparent, mais généralement la barytine est colorée par des impuretés en jaune, en brun et rouge. Le clivage est parfait suivant (001), moyen suivant (210) et imparfait suivant (010). Ayant la masse volumique la plus élevée de tous les sulfates courants, elle possède une dureté de 3 à 3,5. La barytine constitue avec la célestine une série isomorphe, le strontium pouvant se substituer au baryum en toutes proportions. D'autres éléments, dont le calcium et le plomb, peuvent également se substituer au baryum, mais seulement dans des proportions faibles. Elle est insoluble dans l'acide chlorhydrique, même à chaud, soluble dans l'acide sulfurique concentré. La barytine est le minéral de baryum le plus courant de la nature. Elle est fréquente comme minéral de gangue dans les gîtes hydrothermaux, notamment les gîtes formés à moyenne ou basse température, où elle est associée à la fluorine, la calcite, la dolomie ou le quartz (gisements de Koutaïssi, Bolnissi en république de Géorgie, district de la Limagne en France). Elle est également répandue dans les calcaires et autres roches sédimentaires en veines et lentilles, en remplissage de cavités ou sous formes concrétionnées et noduleuses, comme les « roses de barytine ». [17]

Chapitre I

5. Célestite ou Célestine :

Souvent de teinte bleu ciel, d'où son nom (du latin caelestis), la célestite (ou célestine) est un sulfate de strontium, de formule : SrSO_4 . Ce minéral constitue l'un des pôles d'une série isomorphe allant du strontium au baryum (sous sa forme sulfatée : BaSO_4 , barytine), et présentant toutes les combinaisons intermédiaires. Le calcium se substitue également au strontium, mais dans des proportions moindres (de l'ordre de 1 pour 11). Quant au remplacement possible du strontium par les autres ions : mercure et plomb, il est très faible. La célestite cristallise dans le système orthorhombique. Les cristaux, très riches en facettes, sont généralement laminaires ou prismatiques et presque toujours implantés, disposés en groupes, très rarement en macles. Mais, le plus souvent, elle se présente en masses granulaires, veinée, et en rubanements concrétionnés. Bleu ciel, blanc bleuté ou gris bleuté, plus rarement à reflets rougeâtres ou jaunâtres, la célestite possède un éclat vitreux ou nacré sur les plans de clivage. La masse volumique est de 3,9 à 4 g/cm^3 . Sa solubilité dans l'eau (de 0,0132 g/l à 20 °C) est plus grande que celles des barytines, mais inférieure à celle de l'anhydrite. Elle fond à 1 605 °C. Elle montre, parfois, une fluorescence à la lumière ultraviolette. Un produit d'altération fréquent de la célestite est la strontianite. D'autres minéraux peuvent être des pseudomorphes de la célestite tels que calcite, withérite, quartz, calcédoine, etc. Au chalumeau, elle fond en une perle blanche et colore la flamme en rouge pourpre. Elle se dissout dans H_2SO_4 concentré et dans les autres acides à chaud. Les principales occurrences de célestite se rencontrent dans les roches sédimentaires et, plus particulièrement, dans les dolomies et les calcaires dolomitiques ; les cristaux y remplissent des fissures et des cavités.[18]

6. Anhydrite :

L'anhydrite naturelle de formule chimique CaSO_4 se rencontre dans les Formations gypseuses et salifères, ou dans certains gîtes métallifères. On considère qu'elle s'est formée, comme le gypse, par évaporation de l'eau de mer, mais elle peut également résulter d'une déshydratation lente du gypse sous l'effet d'une pression importante lors de plissements géologiques. [19]

6-1. L'anhydrite soluble :

C'est l'étape intermédiaire entre les semi hydratés et l'anhydrite II, il diffère par une teneur très faible en eau de constitution (entre 0,06 et 0,11). Cet anhydrite est très avide à l'eau ce qui justifie sa grande importance dans le plâtre, car selon l'effet désiré une forte proportion en anhydrite III catalyse l'hydratation de ce dernier et inversement. [19]

Chapitre I

6-2. L'anhydrite insoluble :

C'est une phase définie du point de vue cristallographie (système orthorhombique) et thermodynamique, il est obtenu industriellement par cuisson du gypse à des températures allant de 300°C à 700°C et est nommé surcuit. Selon la température de cuisson le produit obtenu sera plus ou moins réactif avec l'eau, la cinétique d'hydratation étant très lente pour un surcuit obtenu au-delà de 700°C, cette forme existe dans la nature sous la même forme cristalline c'est l'anhydrite naturelle et celle obtenue à partir de la cuisson réagissent identiquement au gâchage seule diffère leur vitesse d'hydratation en raison de leur état de surface et de leur porosité. [19]

6-3. L'utilisation de l'anhydrite

Les utilisations de l'anhydrite sont limitées : modificateur du sol, retardant du ciment portland, auparavant l'anhydrite était utilisée comme source de soufre pour la production d'acide sulfurique, l'anhydrite naturelle, ou l'artificielle sous-produit de divers processus industriels, est ajoutée au plâtre afin de modifier certaines de ses caractéristiques, et peut être utilisée pour réaliser des chapes dans les bâtiments, dites « chapes anhydres » ou « chapes d'anhydrite », elles sont de plus en plus utilisées de part leur coût assez faible, leur bonne compatibilité avec les systèmes de planchers chauffants modernes leur grande rapidité de prise, et leur fluidité qui permet une grande précision, par contre elles gardent les propriétés hydrophiles du matériau de départ, l'anhydrite finement broyée s'hydrate rapidement en donnant un matériau particulièrement résistant, d'où son utilisation en projection comme matériau de confortement dans les mines. [19]

7. Le gypse :

Définition

Le gypse est une espèce minérale composée de sulfate dihydraté de calcium de formule $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Le mot gypse désigne ainsi à la fois un corps chimique composé minéral naturel et une roche évaporite majeure. [06]

7-1. Gypse naturel :

C'est un cristal assez fragile dont la taille varie du grain microscopique au géant de plus de 20 cm. Le phénocrystal de gypse est d'ailleurs une splendeur de par sa transparence, qui se retrouve en partie dans ses formes « rocheuses », tout particulièrement la sélénite (pierre de lune), belle pierre incolore d'aspect mystérieux, un peu perlé. Autre gypse prestigieux et poétique : la rose des sables, formée dans des eaux très minéralisées dans des conditions particulières d'évaporation et de tarissement. Le gypse est une roche blanche,

Chapitre I

d'aspect mat, finement cristallin tendre rayable à l'ongle, de densité 2,3. Quelques traces jaune de soufre peuvent apparaître. Constitué en majeure partie de sulfate de calcium hydraté et cristallisé, il masque généralement en surface, l'anhydrite. Plus dure et plus dense [1].

De couleur blanche, parfois jaunâtre à rougeâtre, gris, finement lité ou en feuillets transparents, il existe environ soixante-dix différentes formes cristallines les plus courantes sont : les plaquettes, les prismes, les aiguilles, les lenticulaires, les macles, en agrégats fibreux, gypse saccharoïde à grains fins, pierre réputée pour ses qualités en sculpture, gypse fibreux , gypse « rose des sables ».lorsqu'il est compact à grain blanc et finement cristallisé, il prend le nom d'albâtre (gypse blanc pur). [19]

7-2. Propriétés générales du gypse et de l'anhydrite

Les différentes propriétés du gypse et de l'anhydrite sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau I.1 : Propriétés du gypse et de l'anhydrite [19]

Propriétés	Anhydrite
Formule brute	CaSO ₄
Massa moléculaire	136 g/mol
Système cristallin	De blanc à gris un peu translucide
Clivage	Monoclinique
Fracture	Parfait à {010} et {100}, bon à {001}
Eclat	Conchoïdale à irrégulière
Indice de référence	Vitreux à nacré
Polychroïsme	$\alpha = 1.569-1,573$, $\beta = 1.574- 1.579$, $\gamma = 1.609-1.618$
Solubilité	Ne réagit pas à l'acide
Magnétisme	Aucun
Radioactivité	Aucun

Chapitre I

8. Epsomite

Se présentant généralement en croûtes, en efflorescences ou en groupements de fines aiguilles, ce sulfate de magnésium hydraté cristallise dans le système orthorhombique. Les cristaux peuvent paraître tétraonaux de par la présence d'un angle voisin de 90^0 entre les faces du prisme.

La cassure est conchoïdale. L'epsomite, comme d'autres minéraux solubles avides d'eau, peut être caractérisée par sa saveur : elle présente un goût amer, ce qui lui a valu son appellation de sel amer ou sel anglais, alors qu'elle était utilisée en médecine comme purgatif. Transparente à translucide, avec un éclat vitreux (soyeux pour les variétés en aiguilles), l'epsomite voit sa coloration varier avec les traces qu'elle admet : ainsi, incolore à blanche, elle peut être rosée par le cobalt, ou verdâtre par le nickel. Toutefois sa poussière reste incolore.

D'une dureté proche de celle de l'angle (2 à 2,5), c'est un minéral peu dense (1,68). La caractérisation par voie humide de l'epsomite, $MgSO_4 \cdot 7 H_2O$, est aisée puisque sa solubilité et sa saveur lui sont propres. Outre le nickel et le cobalt, le zinc et le manganèse peuvent entrer dans sa composition chimique. De plus, des phénomènes de substitution en toutes proportions entre zinc, nickel et magnésium conduisent à une série de minéraux secondaires, où nous pouvons citer la goslarite, pôle zincifère, et la morénosite, pôle nickélicifère. L'epsomite, minéral de dépôts marins par évaporation, se forme par altération de la kiesérite $MgSO_4 \cdot H_2O$ ou à partir de l'anhydrite. Son habitat le plus courant est celui des gisements de sels potassiques (cas des sels de Sibérie ou de Californie). Ce minéral résulte aussi parfois de l'altération de roches magnésiennes. [20]

-III- Les Carbonates

1. Définition :

Les carbonates sont des minéraux largement représentés à la surface du globe. Le carbonate de calcium, en particulier, est le constituant principal des coquilles de nombreux organismes. On le retrouve surtout dans la lithosphère sous forme de roches dites calcaires, les plus abondantes parmi les roches sédimentaires. Ce stock considérable de carbone est alimenté par le métabolisme des êtres vivants sous forme de gaz carbonique, lequel donne notamment, en se combinant avec les métaux divalents, des composés insolubles dans les conditions normales de la lithosphère : les carbonates. Des dissociations ultérieures peuvent

Chapitre I

cependant intervenir, à la faveur desquelles le carbone mis en réserve est restitué à la biosphère et à l'atmosphère. Ainsi les carbonates se trouvent à la croisée des cycles biochimique et géochimique du carbone, localisés essentiellement dans la zone superficielle de la lithosphère. La présence des carbonates dans les roches d'origine interne est, en effet, exceptionnelle et elle pose l'un des problèmes les plus intéressants de la pétrologie, celui de l'origine « primaire » du carbone en profondeur.

Le caractère structural essentiel des carbonates est la présence de l'ion CO_3^{2-} . Tout atome de carbone s'y trouve au centre d'un triangle équilatéral dont chacun des sommets est occupé par un atome d'oxygène. Aucun ion oxygène n'est commun à deux groupements triangulaires carbone-oxygènes ; ceux-ci doivent être considérés comme des unités distinctes dans la structure des minéraux carbonatés et ils sont largement responsables des propriétés particulières de ce groupe. La liaison entre le carbone central et les oxygènes qui lui sont coordonnés n'est pas aussi forte que celle qui existe dans CO_2 . En présence de l'ion hydrogène, le radical carbonate devient instable et se brise pour fournir du gaz carbonique et de l'eau. Cette instabilité est à l'origine des tests avec les acides, utilisés pour la reconnaissance des carbonates. [21]

-IV- Les Nitrates :

Les nitrates (NO_3^-) sont des composés chimiques incolores et inodores présent de façon naturelle dans tous les écosystèmes. Ils résultent du cycle de l'azote comme nous avons expliqué précédemment et sont des substances nutritives indispensables à la vie végétale. Les nitrates sont très solubles dans l'eau. Ne sont pas retenus par le sol et migrent aisément vers les eaux, ne sont pas retenus par le sol et migrent aisément vers les eaux superficielles et souterraines lorsque les niveaux excèdent les besoins de la végétation [santé canada, 1992]. Ils figurent parmi les constituants majoritaires des engrais chimiques et naturels (fumiers) et aussi ils sont utilisés dans les explosifs, comme agents oxydants dans l'industrie chimique et comme agents de conservations. [22]

Substances chimiques naturelles qui entrent dans le cycle de l'azote. Le nitrate est beaucoup utilisé dans les engrais inorganiques et les explosifs, comme agent de conservation des aliments et comme substance chimique brute dans divers procédés industriels. Le nitrate représente la plus stable des deux formes de l'azote, mais sous l'action microbienne, il peut être réduit en nitrite (NO_2^-), qui est la forme la plus toxique. Il est présent à l'état naturel partout dans l'environnement. Il est le produit de l'oxydation de l'azote de

Chapitre I

l'atmosphère (représente 78%) par les microorganismes des plantes, du sol ou de l'eau et, dans une moindre mesure, par les décharges électriques comme la foudre.

Toutes les sources d'azote sont des sources potentielles de nitrate. Dans l'eau, ces substances peuvent provenir de la décomposition de matières végétales ou animales, d'engrais utilisés en agriculture, du fumier, d'eaux usées domestiques et industrielles, des précipitations ou de formations géologiques renfermant des composés azotés solubles. Normalement, la concentration de nitrates dans les eaux souterraines et les eaux de surface est faible, mais elle peut atteindre des niveaux élevés à cause du lessivage des terres cultivées ou de la contamination par des déchets d'origine humaine ou animale.

Des concentrations excessives de nitrates dans l'eau potable peuvent causer des maladies graves et parfois mortelles, notamment chez les jeunes enfants. Chez les adultes et les nourrissons, l'effet néfaste est lié à la conversion de nitrate en nitrite dans l'organisme, ce qui interfère avec la capacité du sang à transporter l'oxygène (pouvoir oxyphorique). Cette condition est connue sous le nom de "méthémoglobinémie" ou de "maladie bleue", parce que les symptômes comprennent l'essoufflement et la cyanose (coloration bleue de la peau). Les nourrissons de moins de trois mois y sont particulièrement vulnérables. [23]

1. Les hydroxydes et Oxydes :

1-1. Hydroxydes :

Composés chimiques contenant un ou plusieurs groupes d'ions hydroxydes (OH^-). Le cation est en général un ion métallique (Na, K, Mg, Ca, Al) ou un radical organique (comme le tétraméthylammonium).

Les hydroxydes sont des bases plus ou moins fortes, les plus fortes étant celles des métaux alcalins (lessives), qui sont très solubles dans l'eau et très caustiques (soude caustique). L'hydroxyde de lithium, LiOH , est moins soluble et moins stable que ceux des autres métaux alcalins ; il se décompose au rouge avec perte d'eau et formation d'oxyde Li_2O . Les hydroxydes des métaux alcalino-terreux (Ca, Ba, Sr) sont des bases moins fortes et moins solubles ; le plus courant est le lait de chaux. La solution fraîchement filtrée de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ se trouble dans l'air libre et laisse peu à peu un dépôt blanc de carbonate par absorption de l'acide carbonique.

Certains hydroxydes (de Be, Pb, Zn, Al, Cr, etc.) présentent des propriétés à la fois d'acides et de bases, d'où leur dénomination d'amphotère. [24]

Chapitre I

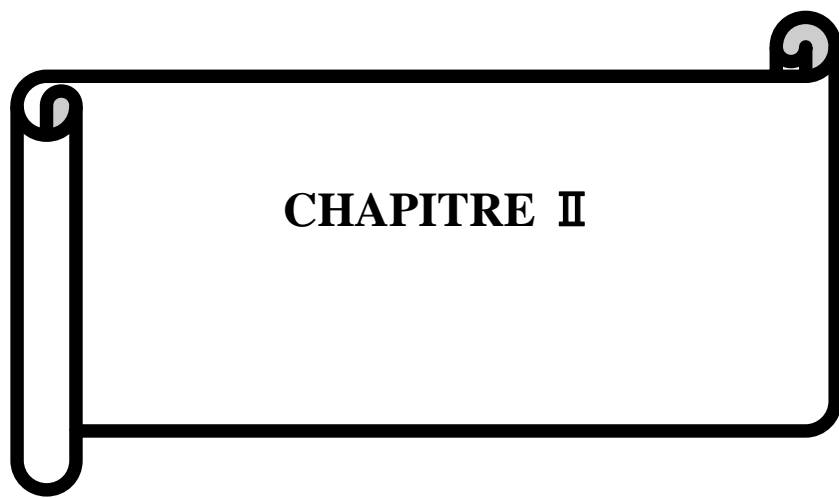
1-2. Les oxydes :

Dans les vitrines 3 et 4 se trouvent les minéraux issus de la combinaison de métaux et d'oxygène : les oxydes et les hydroxydes. C'est dans cette famille que l'on trouve les minerais de fer, d'étain, d'aluminium. La pierre précieuse telle que les rubis et les saphirs exposés dans la vitrine 3 font également partie des oxydes.

L'oxyde se prépare par calcination de l'hydroxyde, du carbonate basique, de l'oxalate ou de l'acétate basique, ces deux derniers étant préférables lorsqu'un produit de très haute pureté est nécessaire. Après un chauffage à $960\text{ }^{\circ}\text{C}$, l'oxyde se présente sous forme de grains à peu près sphériques, d'un diamètre voisin de $0,1\text{ }\mu\text{m}$. Ces poudres très fines donnent, après frittage, des réfractaires de haute densité. Cet oxyde fond à $2\ 550 \pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ et la température d'ébullition déterminée par extrapolation serait de $4\ 000 \pm 100\text{ }^{\circ}\text{C}$. La glucine frittée possède une bonne stabilité dimensionnelle à haute température et c'est le seul réfractaire non conducteur de l'électricité, ce qui permet de l'utiliser comme gaine de protection pour les thermocouples dans les fours à induction.

L'oxyde de béryllium cristallise dans une structure type wurtzite, alors que les autres oxydes alcalino-terreux possèdent un réseau du type du chlorure de sodium. La petite taille de l'ion Be^{2+} ne peut en effet s'accommoder d'une coordinence avec six atomes d'oxygène, comme le magnésium ou le calcium. Les forces d'attraction électrostatique entre les ions varient avec le carré de la distance entre les particules ; l'ion Be^{2+} étant très petit, la cohésion est grande et l'oxyde de béryllium est un composé extrêmement dur, comparable sur ce point au carbure de titane (9,0 dans l'échelle de Mohs) ; les liaisons métal-oxygène ne sont pas exclusivement ioniques, car l'ion O^{2-} est très polarisable tandis que l'ion Be^{2+} très polarisant.

L'hydroxyde, ou glucine hydratée, possède une variété amorphe gélatineuse contenant une quantité d'eau mal définie et deux variétés cristallines répondant bien à la formule $\text{Be}(\text{OH})_2$. La précipitation à froid par l'ammoniaque donne une sorte de gel, qui cristallise à chaud ou par vieillissement ; les variétés cristallines peuvent aussi précipiter des solutions de béryllates à l'ébullition. Les hydroxydes cristallisés sont très peu solubles. [25]



CHAPITRE II

Chapitre II :

I -1. Introduction :

La spectrométrie infrarouge permet d'identifier les composés organiques et inorganiques, qu'ils soient cristallins ou amorphes. Elle saisit seulement les mouvements (vibrations par exemple) des atomes les uns par rapport aux autres. Elle est devenue de plus en plus intéressante avec l'apparition des spectromètres à transformée de Fourier. L'analyse des produits inorganiques peut se faire de manière très efficace, sur de très faibles quantités par micro-prélèvement (~30 mg), ce prélèvement se fait soit par grattage d'une surface, ou par prélèvement sur une poudre finement broyée.

L'utilisation d'un support en bromure de césium (CsBr de l'ordre de 100mg) et d'un spectromètre allant dans l'infrarouge lointain jusqu'à 200cm⁻¹, un support de bromure de potassium (KBr) peut aller vers 400cm⁻¹. Ainsi on peut identifier la plupart des produits analysés, qu'ils soient amorphes, mal ou bien cristallisés. La différence entre les états est reflétée sur les aspects de raies obtenues (pic fin, pic large, ...). Le domaine de signature des matériaux (oxydes, carbonates, sulfates, ou autres) se situe entre ~1500 et 200 cm⁻¹, cette partie du spectre FTIR est nommée **finger-print**.

Ce qui permet d'avoir des informations très utiles. Cette technique d'analyse complète ainsi les informations obtenues à partir des méthodes d'analyses dites classiques telles que la diffraction des rayons X ou la microscopie électronique à balayage. La conjugaison de tous les résultats expérimentaux permet de voir, d'analyser et d'affiner au mieux la structure des matériaux. Le travail qui suit donne la démarche à suivre lors d'un travail expérimental de spectroscopie FTIR, nous avons choisi d'analyser les divers minéraux des sites de Chechar, Ain Mimoun, Bouhemama, et Mesloul.

Chapitre II :

2. Rappel théorique

2-1. Les rayonnements électromagnétiques

Définition

Ensemble de radiations de natures similaires mais dont les longueurs d'ondes sont différentes. Les rayonnements électromagnétiques sont plus communément appelés lumières, que celles-ci soient visibles par l'homme (lumière blanche) ou non visibles par l'homme (Ultraviolet, Infrarouge, rayon, etc.) [1]. Le rayonnement électromagnétique correspond à l'ensemble des radiations émises par une source qui peut être soit le soleil, soit la surface terrestre ou océanique ou l'atmosphère, ou bien encore le capteur satellitaire lui-même, sous forme d'ondes électromagnétiques ou de particules.

La relation suivante exprime la quantité d'énergie associée à un photon en fonction de la fréquence de l'onde :

$$E = h \nu$$

où :

- E : l'énergie de l'onde électromagnétique
- ν : la fréquence de l'onde
- h : la constante de Planck ($6,625 \cdot 10^{-34}$ J.s)

Ainsi, les rayonnements électromagnétiques de courte longueur d'onde ou de fréquence élevée véhiculent davantage d'énergie que les rayonnements de grande longueur d'onde (basse fréquence).

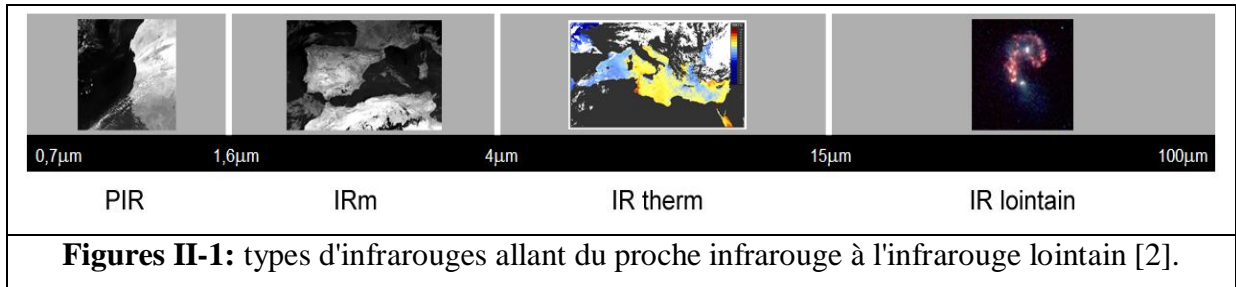
Tableau 1 : Gammes spectrales Electromagnétiques

Type de rayonnement	Longueur d'onde	Nombre d'onde- cm^{-1}	Energie- eV
Ondes radio	Sup. 30 cm	3.3333×10^{-2}	4.1328×10^{-6} eV
Micro-ondes	1mm- 30 cm	$10 - 3.3333 \times 10^{-2}$	$1.2398 \times 10^{-3} - 4.1328 \times 10^{-6}$
Loin-loin infrarouges	40000 nm -1 mm	250 - 10	$3.0996 \times 10^{-2} - 1.2398 \times 10^{-3}$
Loin infrarouges	6000 nm-40000 nm	1666.7 - 250	$0.20664 \times 10^{-3} - 3.0996 \times 10^{-2}$
Moyen infrarouges	1300 nm- 6000 nm	7692.3 - 1666.7	$0.95372 - 0.20664 \times 10^{-3}$
Proches infrarouges	700 nm-1300 nm	14286- 7692.3	1.7712- 0.95372
Visibles	400 nm- 700 nm	25000 - 14286	3.0996 - 1.7712
Ultraviolets	10 nm- 400 nm	$1 \times 10^{+6} - 25000$	123.98 - 3.0996
Rayons-X	0.01 nm- 10 nm	$10 \times 10^{+8} - 1 \times 10^{+6}$	$1.2398 \times 10^{+5} - 123.98$
Rayons-gamma	Inf. 0.01 nm	Sup. $10 \times 10^{+8}$	Sup. $1.2398 \times 10^{+5}$

Chapitre II :

2-3.L'infrarouge

Le domaine de l'infrarouge est relativement étendu couvrant les longueurs d'onde de $\sim 0,7\mu\text{m}$ à $\sim 100\mu\text{m}$. Dans cette gamme de longueurs d'onde, on distingue généralement quatre types d'infrarouges qui vont du proche infrarouge à l'infrarouge lointain, en passant par l'infrarouge moyen et le thermique [2].



Le nombre d'onde, couramment noté σ , désigne l'inverse de la longueur d'onde λ :

$$\sigma = 1 / \lambda$$

Il est l'analogue dans l'espace de la fréquence (temporelle) et est d'ailleurs souvent appelé fréquence spatiale.

3. Théorie de la spectroscopie Infra Rouge

Le rayonnement électromagnétique a la capacité d'interagir avec la matière et d'échanger de l'énergie, donnant ainsi naissance à un spectre d'absorption. Dans les spectroscopies vibrationnelles, auxquelles appartiennent le NIR et le MIR, les interactions se traduisent par le transfert de l'énergie du rayonnement vers l'énergie mécanique associée principalement à la vibration des atomes dans les liaisons chimiques (vibrations d'étirement et de flexion).

La région NIR se trouve le plus près de la région de la lumière visible et comprend la gamme de longueur d'onde de $\sim 780 \text{ nm}$ à 2500 nm (nombre d'ondes: $1280\text{-}4000 \text{ cm}^{-1}$).

La région MIR couvre la gamme de longueur d'onde supérieure de 2500 à $15\,000 \text{ nm}$ (nombre d'ondes: $4000\text{-}660 \text{ cm}^{-1}$).

L'infrarouge lointain (FIR) est la gamme de $15\,000 \text{ nm}$ à $100\,000 \text{ nm}$ (nombre d'ondes: $660\text{-}10 \text{ cm}^{-1}$).

Les transitions d'énergie vibratoire sont expliquées à partir des modèles d'oscillateur harmonique et anharmonique, qui tous deux considèrent le cas simple d'une molécule diatomique. Seul le modèle d'oscillateur anharmonique est valide pour les molécules réelles [3].

Chapitre II :

Ainsi, le domaine infrarouge se subdivise en trois régions:

Tableau

Tableau 2 : Gammes Infra Rouges

Gamme IR	nombre d'onde	longueur d'onde
infrarouge proche (PIR)	13,333-4,000 cm ⁻¹	0.8-2.5 μm
infrarouge moyen (IRM)	4000-400 cm ⁻¹	2.5-25 μm
infrarouge lointain (IRL)	400-10 cm ⁻¹	25-1000 μm

Dans le domaine infrarouge moyen les bandes d'absorption ou de réflexion sont normalement dues aux divers groupements atomiques des minéraux. Les spectres dans l'infrarouge moyen d'un minéral apportent toujours des informations importantes sur les groupements fonctionnels qui le constituent. La plupart des bandes caractéristiques des minéraux se rencontrent dans la zone moyenne du spectre infrarouge. De ce fait, les recherches sur les minéraux et les gammes sont nombreuses dans ce domaine [4].

Ces grandeurs étant caractéristiques de la molécule, en analysant des radiations absorbées par l'échantillon on peut donc identifier les transitions entre niveaux d'énergie et en déduire des informations sur la structure de cette molécule [5].

4. Vibration d'une molécule polyatomique :

L'absorption infrarouge par une molécule polyatomique se traduit par deux types de vibrations :

- La vibration d'élongation, et la vibration de déformation (variation d'un angle de valence).

Exemples : Pour une molécule coudée comme H₂O (N = 3) : il y aura 3 modes de vibrations normaux soit 3 fréquences de vibration possibles.

Le premier spectre à connaître en spectroscopie infrarouge est celui de l'eau, car ce dernier est toujours présent dans les éléments à analyser. Il est donc impératif de reconnaître la signature de H₂O, afin de pouvoir indexer les raies qui lui correspondent dans les spectres FTIR obtenus pour les minéraux analysés.

La figure ci-dessous donne le spectre FTIR de H₂O,

Chapitre II :

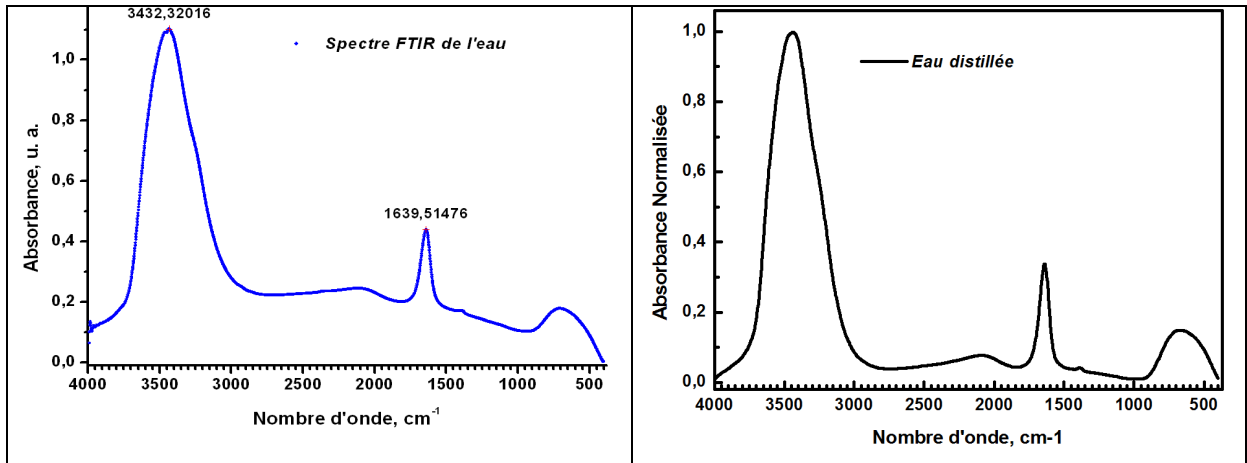


Figure II-2: Spectre Infrarouge à transformée de Fourier de l'eau, et l'eau distillée.

	<p>Un mode de vibration d'élongation (stretching) symétrique situé à $\sim 3652 \text{ cm}^{-1}$ (soit pour une longueur d'onde de $2,74 \mu\text{m}$). Les deux liaisons s'allongent et se raccourcissent simultanément</p>
	<p>Un mode de vibration d'élongation (stretching) antisymétrique situé à $\sim 3756 \text{ cm}^{-1}$ (soit pour une longueur d'onde de $2,66 \mu\text{m}$). Lorsqu'une liaison s'allonge, l'autre se raccourcit et vice-versa.</p>
	<p>Un mode de vibration de déformation (dit de cisaillement) situé à $\sim 1595 \text{ cm}^{-1}$ (soit pour une longueur d'onde de $6,27 \mu\text{m}$). L'angle entre les liaisons H-O-H oscille.</p>
<p>Figures II-3: divers types de vibrations dans la molécule d'eau [6].</p>	

- les vibrations d'élongation symétriques : les atomes liés s'approchent ou s'éloignent de façon symétrique ;
- les vibrations d'élongation antisymétriques : de même mais cette fois-ci lorsqu'une liaison est comprimée, l'autre est étirée,
- les vibrations de déformation d'angle.

La raie entre 500 et 1000 cm^{-1} est liée aux vibrations du réseau (translation, et rotation).

Ces grandeurs étant caractéristiques de la molécule, en analysant des radiations absorbées par l'échantillon on peut donc identifier et en déduire cette molécule.

.....

Chapitre II :

Détection FTIR des ions carbonate par spectrométrie IR

Comme représenté sur la figure ci-dessous, nous distinguons deux principaux modes

- Des modes dit modes réseau, correspondant à des translations, et de rotation,
- Des modes dit modes internes, qui correspondent aux vibrations d'élongations (symétriques et asymétriques), et des vibrations de déformations.

En spectroscopie infrarouge, nous nous intéressons aux modes dits internes.

Nous adopterons dans tout le mémoire les notations suivantes :

.....

Tableau 3 : Les diverses vibrations internes

Notation adoptée	Type de vibration
v1	Vibration d'élongations (symétrique)
v2	Vibration de déformation (hors plan)
v3	Vibration d'élongations (symétrique)
v4	Vibration de déformation (dans le plan)

.....

Le spectre Raman, permet d'avoir les raies correspondantes aux vibrations réalisées.

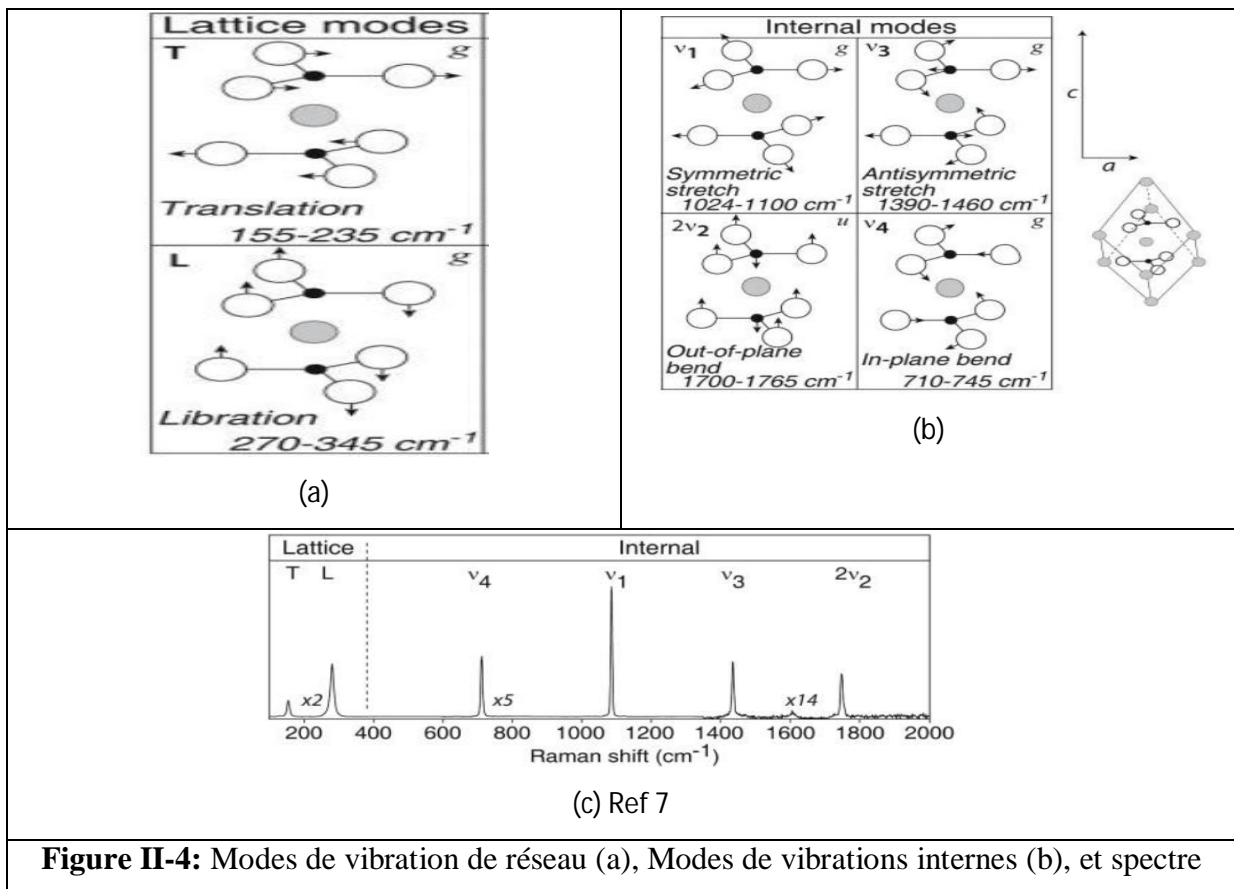


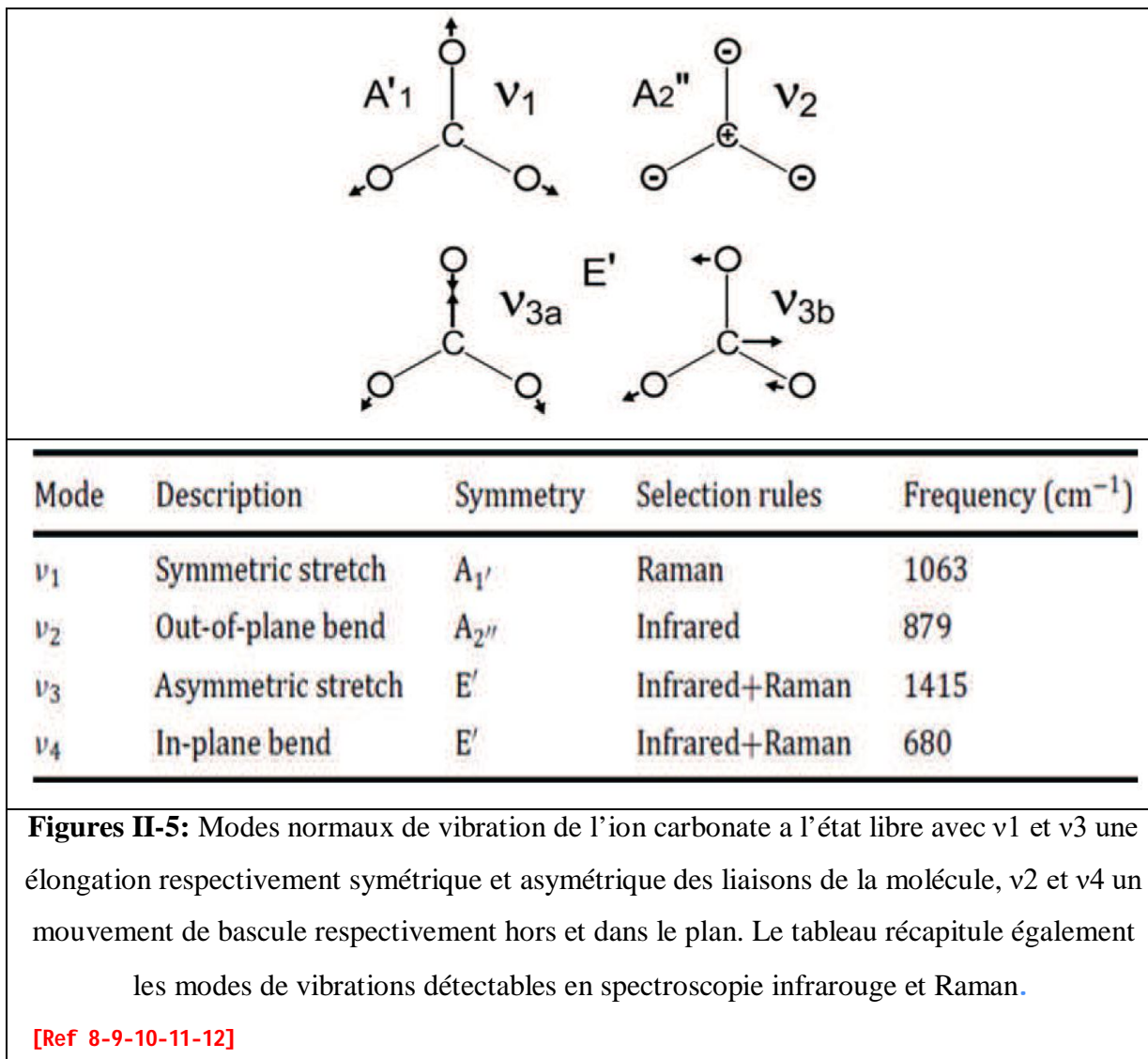
Figure II-4: Modes de vibration de réseau (a), Modes de vibrations internes (b), et spectre

Chapitre II :

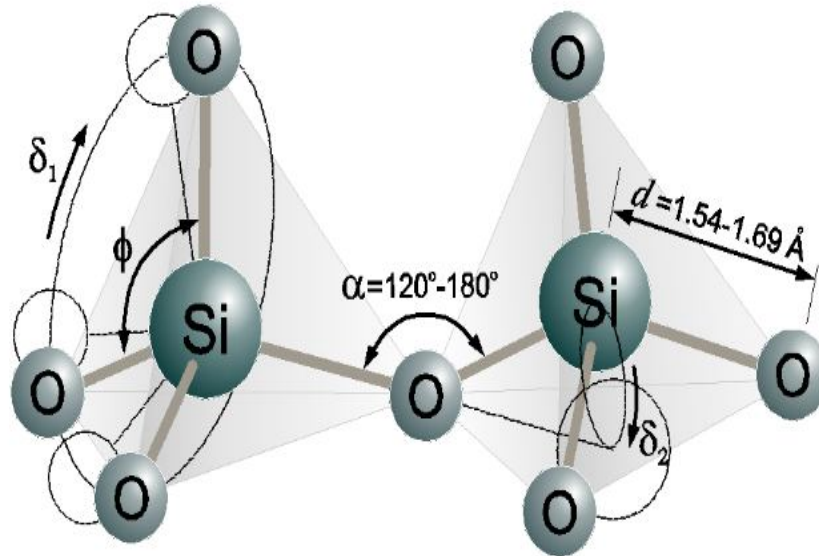
Raman (c).

Détection des ions carbonate par spectrométrie IR

La Figure II-5 présente les modes normaux de vibration de l'ion carbonate à l'état libre. La plupart de ces modes sont visibles en spectroscopie IR sauf le mode ν_1 . Il y a ainsi trois grands domaines de vibration du groupement carbonate détectables en IR vers 1415 cm^{-1} (ν_3), 879 cm^{-1} (ν_2), et 680 cm^{-1} (ν_4).

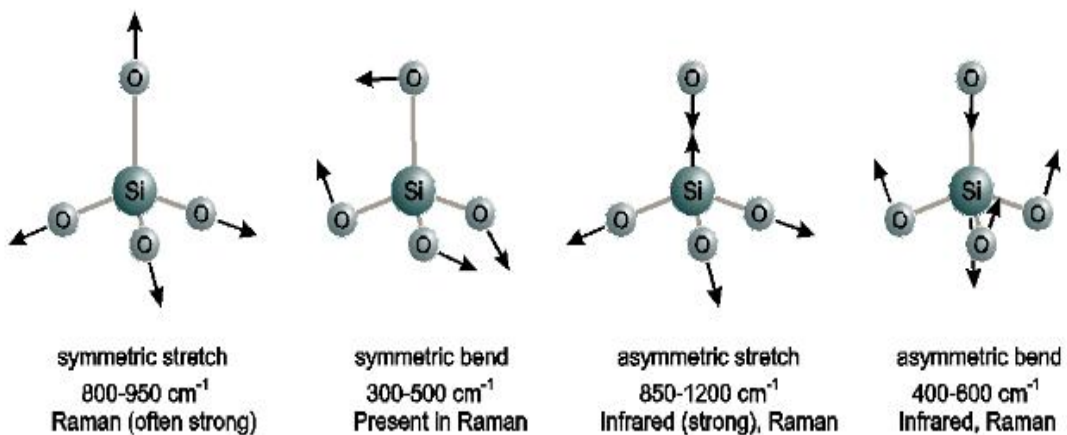


Chapitre II :



Figures II-7: Schéma tridimensionnel d'un fragment pur de la structure régulière de la silice.

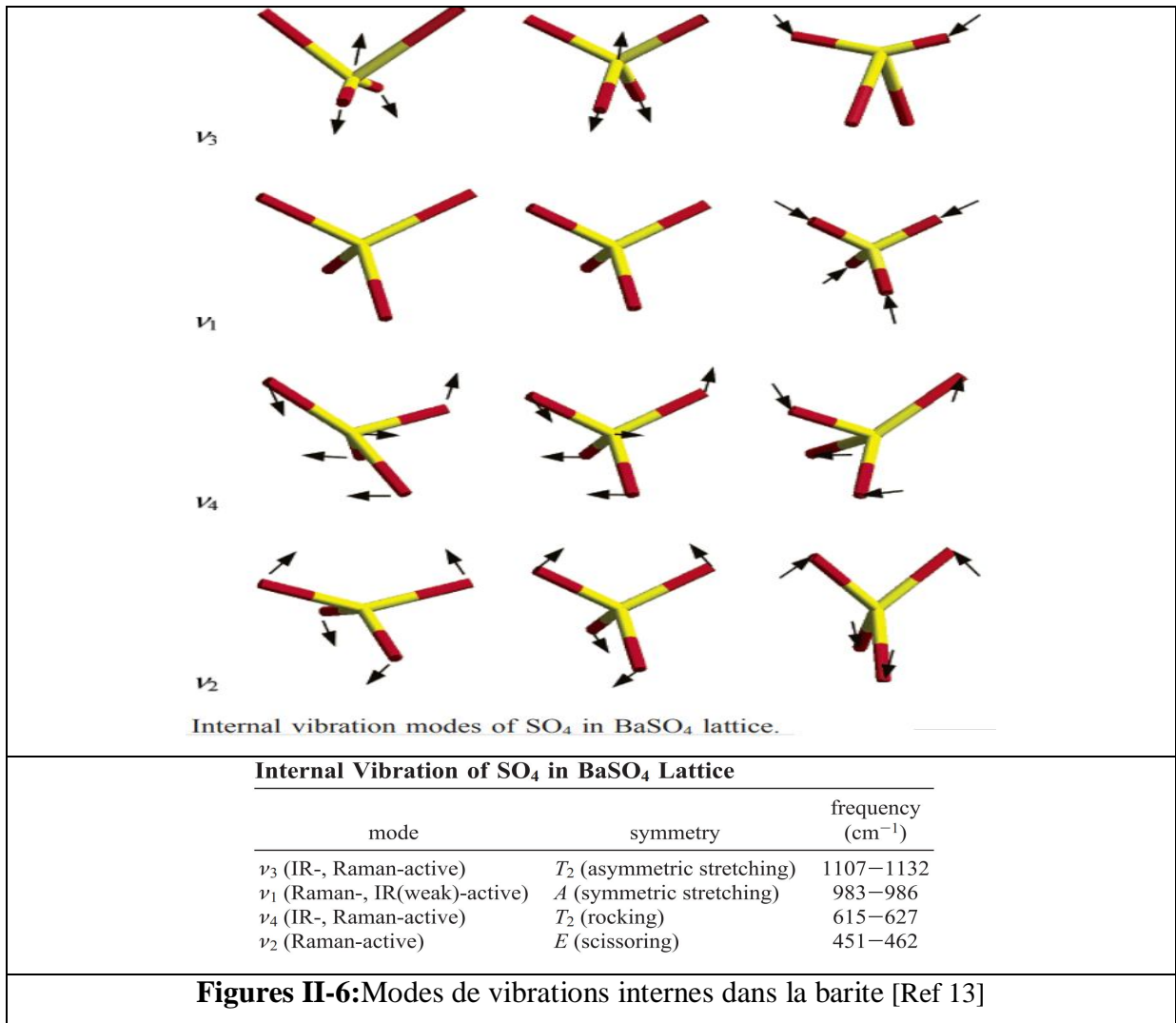
La structure est définie par plusieurs paramètres; la longueur de liaison Si-O (d), l'angle tétraédrique (ϕ), l'angle de liaison inter-tétraédrique (α) et les angles de torsion de liaison (δ_1 , δ_2), [Ref 14] [Henderson and Baker 2002].



Figures II-8: Principaux modes vibrationnels pour un groupe non linéaire, [Ref 15] [Silverstein et al.

1981].

Chapitre II :

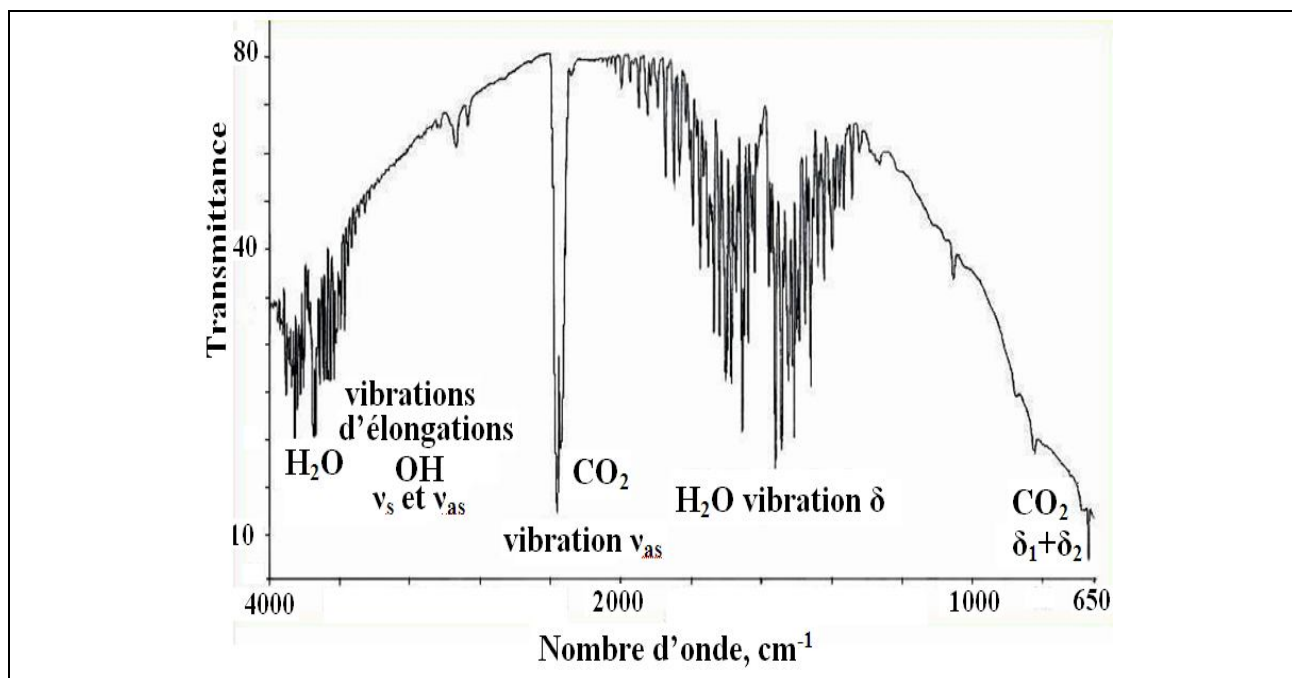


.....

II. Mode opératoire et accessoires de spectroscopie FTIR

- La technique FTIR a été utilisée dans les modes d'absorbance dans la gamme de 400-4000 cm⁻¹. Dans le cas des oxydes (par exemple) il est impératif d'avoir toutes les bandes de fréquences caractéristiques entre 400 et 1000 cm⁻¹. L'appareil est équipé d'un système permettant la réduction des cours d'optique dans l'air afin de minimiser les perturbations associées à l'air ambiant (vapeur d'eau et de CO₂).

Enregistrement du spectre Background



Figures II-9: Exemple de background enregistré préalablement à l'analyse FTIR [16]

Sur le spectre enregistré, on repère 3 bandes d'absorption significatives qui correspondent aux vibrations actives dans l'IR de la vapeur d'eau et du dioxyde de carbone. Elles comprennent de nombreuses raies qui seront ici attribuées à des transitions vibro-rotationnelles (enregistrées seulement en phase gazeuse). La bande située près de 2400 cm^{-1} est due à la vibration d'élongation asymétrique de la molécule de CO_2 , une meilleure résolution montrerait également une structure fine avec raies. La spectroscopie utilisée pour obtenir le spectre d'absorption, ou de transmission d'un échantillon solide, liquide ou gazeux. Elle permet via la détection des vibrations caractéristiques des liaisons chimiques, d'effectuer l'analyse des fonctions présentes dans le matériau. Les spectres IR ont été obtenus en utilisant un spectromètre Perkin-Elmer (figure) à une résolution de 8cm^{-1} . Pour chaque échantillon, 120 scans ont été utilisés. L'incertitude sur la position des différents pics est égale à $\pm 2\text{cm}^{-1}$. Entre 20-40 mg de la matière à analyser sont prélevés, mis dans un mortier en agathe, et ensuite mélangée à ~ 100 mg de poudre de KBr. Un broyage pendant au moins 03 minute est nécessaire afin d'avoir un ensemble finement broyé et bon pour pastillage. Le mélange est introduit dans le moule pour pastille, ensuite comprimé-pastillé

Chapitre II :

dans presse hydraulique (à une pression de 10 Tonnes), La pastille est ensuite extraite avec précaution du moule pour être placée dans un porte échantillon.

L'appareillage analyse préalablement un spectre background relatif à l'atmosphère qui règne dans la salle d'analyse. Une fois l'échantillon placé dans l'appareil, Les spectres de transmission ont été obtenus, après une 20 de secondes. Tous les spectres infrarouges sont des rapports d'absorbance (A) en fonction des nombres d'ondes incidentes.

.....

La spectroscopie infrarouge dans le domaine de longueur d'onde de l'infrarouge moyen (entre 2.5 et 250000 μm) sonde les vibrations intramoléculaires au sein de molécules sous forme solide, liquide ou gazeuse. Les modes de vibration actifs en infrarouge impliquent des variations de moments dipolaires dynamiques au sein du système étudié dans la gamme d'énergie transmise de nombre d'onde (4000 à 400 cm^{-1}).

L'absorbance :

L'absorbance mesure la capacité d'un milieu à absorber la lumière qui le traverse. On utilise aussi les termes densité optique, opacité ou extinction selon les domaines avec des expressions mathématiques qui diffèrent légèrement. L'absorbance est une grandeur sans unité définie par le logarithme de base dix du rapport entre l'intensité lumineuse I_0 , à une longueur d'onde λ , avant traversée du milieu, et l'intensité lumineuse transmise I , ou plus simplement par le logarithme décimal de l'inverse de la [transmittance](#) T :

$$A_{\lambda} = \log_{10} \frac{I_0}{I} = \log_{10} \frac{1}{T}$$

L'absorbance diffère selon la nature de la substance étudiée, selon la longueur d'onde sous laquelle elle est analysée, et selon la concentration de cette substance dans le milieu traversé. Ce milieu peut être solide, liquide ou gazeux, pour autant qu'il soit transparent.

L'absorbance est couramment mesurée par un spectrophotomètre [Ref 17].

.....

Chapitre II :

Les principaux accessoires utilisés lors de la réalisation de pastilles KBr, et jusqu'à l'analyse :



Figures II-10: accessoires pour préparation de pastille KBr.

.....
.....

Chapitre II :



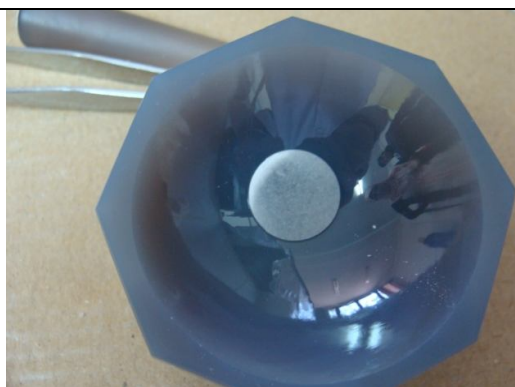
Presse pour pastillage



Cadran de lecture de la pression
Indiquant ~10 t
appliquée lors du pastillage



Pastille KBr sur le moule



Pastille KBr sur le mortier



Chapitre II :

Figures II-12: Exemple de pastilles.



Le spectromètre



Placement de l'échantillon



Figures II-13: Spectromètre FTIR.

Chapitre II :

1. Images optiques, données cristallographiques, analyses FTIR du Gypse, et applications

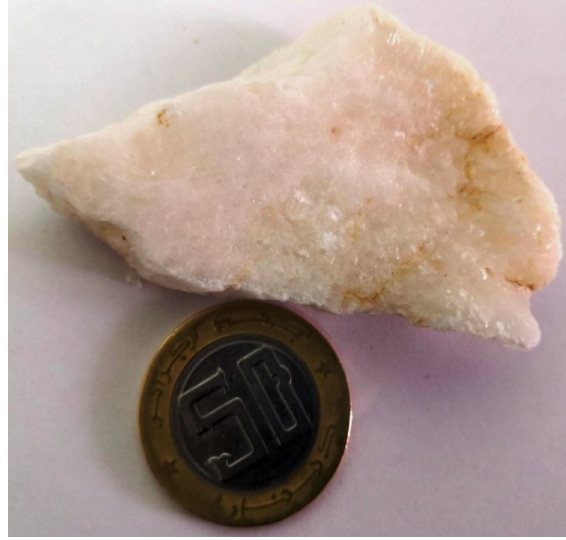
Le gypse de Chechar, a été collecté dans la zone représentée sur les prises de vues en figure II-14 (a), et les images en **Figures II-14 (b)** représentent les échantillons étudiés.

.....



Figures II-14 (a): Prises de vue de la zone de collecte du gypse, lieu dit –Ichet- Chechar, de la région de Chechar, sur la route nationale Khenchela-Chechar-Biskra.

Chapitre II :



Figures II-14 (b): Le gypse de Chechar



Gypse-Bouhmama



Gypse-Ain-Mlila

Chapitre II :



Gypse-Tekkout-Arris

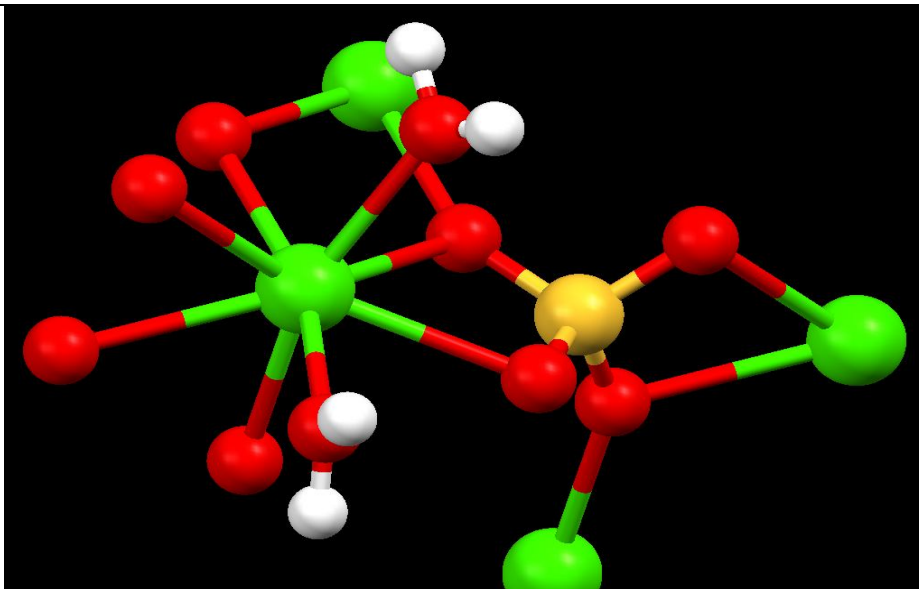


Gypse-Mesloul-Tebessa

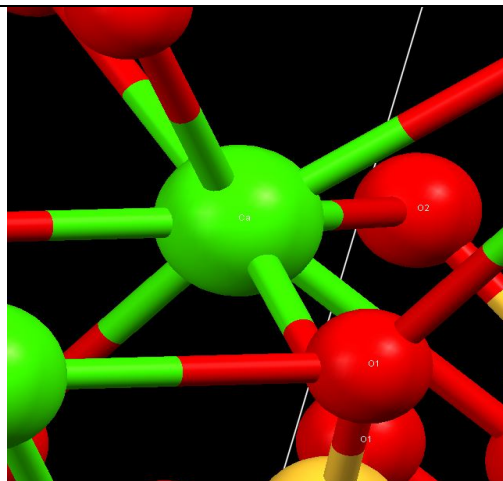
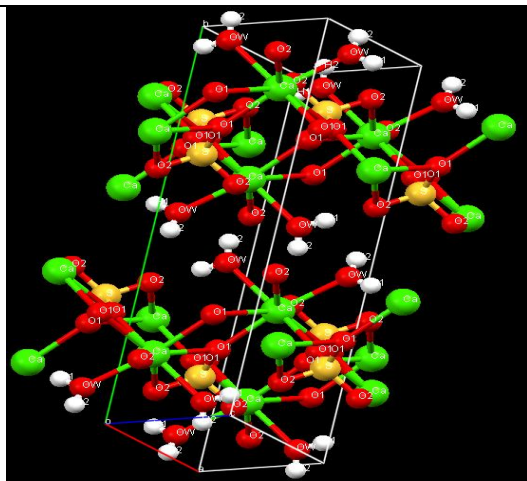
Figures II-15:Divers Gypses de la région de l'est Algérien.

.....

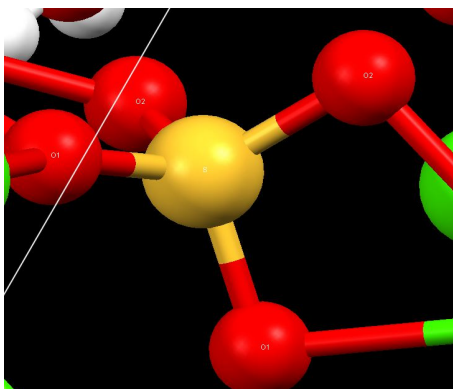
La figure ci-dessous, représente les diverses images moléculaires, obtenues par le logiciel Mercury, images correspondantes à la maille conventionnelle du gypse, les atomes autour du Ca, et atomes autour de S. (On y constate que l'élément calcium est entouré de 8 atomes d'oxygène, et que le soufre est entouré de 4 atomes d'oxygène. Enfin nous constatons que la molécule de H₂O, est liée au Calcium.



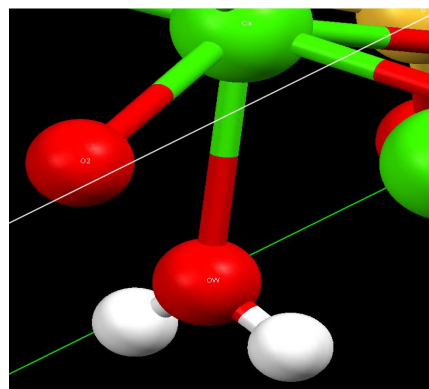
Chapitre II :



CaO₈



SO₄



OH₂

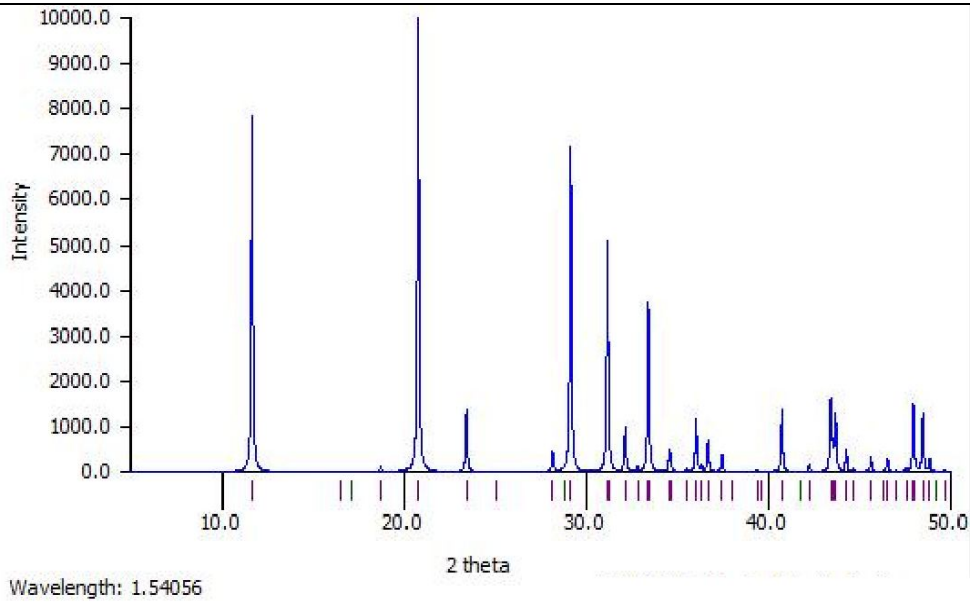
Figures II-16:

-Maille conventionnelle du Gypse,

.....

La figure ci-dessous donne le spectre de diffraction par rayons X, correspondants au gypse (ce diagramme est donné par le logiciel Mercury), et ne correspond pas à une analyse de notre gypse (car nous n'avons pas pu accéder à un diffractomètre).

Chapitre II :



Gypsum, JCPDS 01-070-0982, 03-0044, 06-0047, 33-0311, 70-0982, 70-0983, 70-0984, 72-0596, 74-1904, 74-1905,

Crystal system: Monoclinic

Space group: $C2/c$

Space group number: 15

Figures II-16-suite:

- Maille conventionnelle du Gypse,
- Spectre de diffraction RX du Gypse,

L'exploitation du logiciel Mercury, nous permet aussi, d'accéder à quelques constantes cristallographiques que nous avons mises sur le tableau ci-dessous.

.....

Chapitre II :

Identifier	global
Author(s)	Comodi P, Nazzareni S, Zanazzi P F, Speziale S
Literature Reference	<i>American Mineralogist</i> (2008), 93 , 1530
Formula	H ₄ Ca O ₆ S
Compound Name	
Synonym	
Space Group	C 2/c
Cell Lengths	a 6.277 b 15.181 c 5.672
Cell Angles	α 90 β 114.11 γ 90
Cell Volume	493.34
Z, Z'	Z : 0 Z' : 0
R-Factor (%)	

Figures II-16 suite:
Données cristallographiques du gypse.

[Ref 18-19]

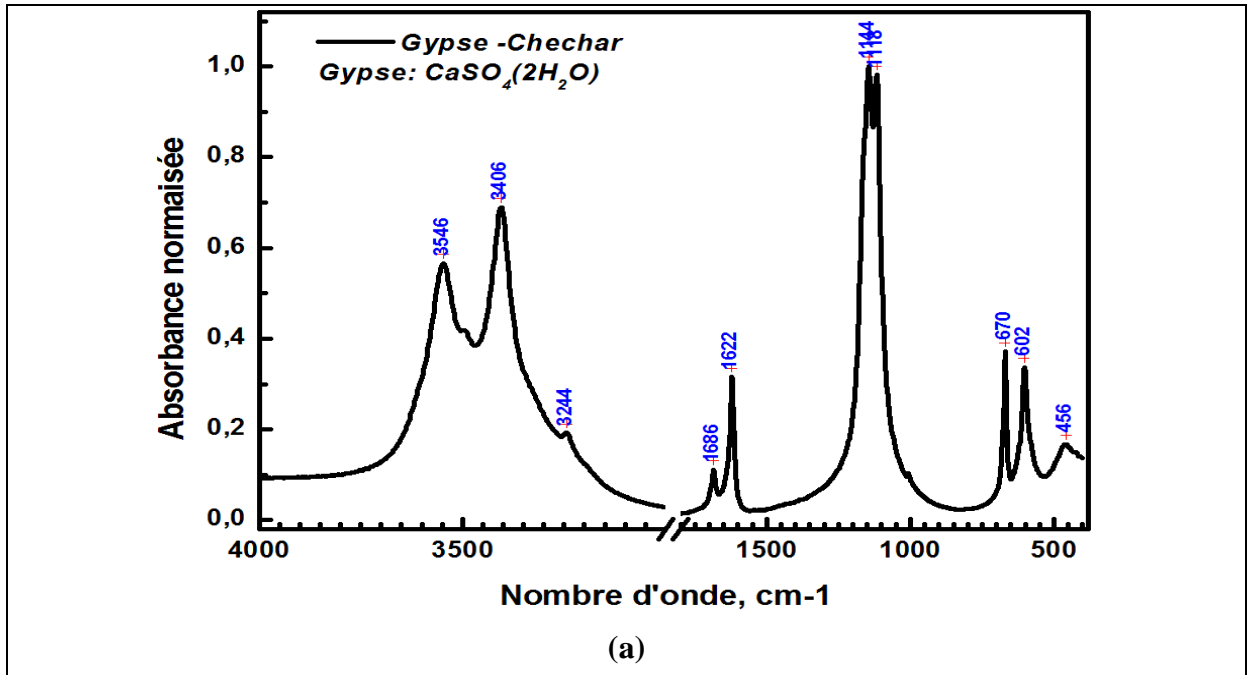
.....

Notre travail, étant consacré à l'analyse par spectroscopie Infra Rouge à Transformée de Fourier, nous représentons ci-dessous les spectres FTIR dans la gamme entre 400- et 4000 cm⁻¹, et ensuite entre 400 et 2000 cm⁻¹ et qui correspondent au gypse de Cherchar.

Chapitre II :

Résultats d'analyses FTIR

.....



Figures II-17: Spectre FTIR du gypse dans la gamme 400-4000 cm-1.

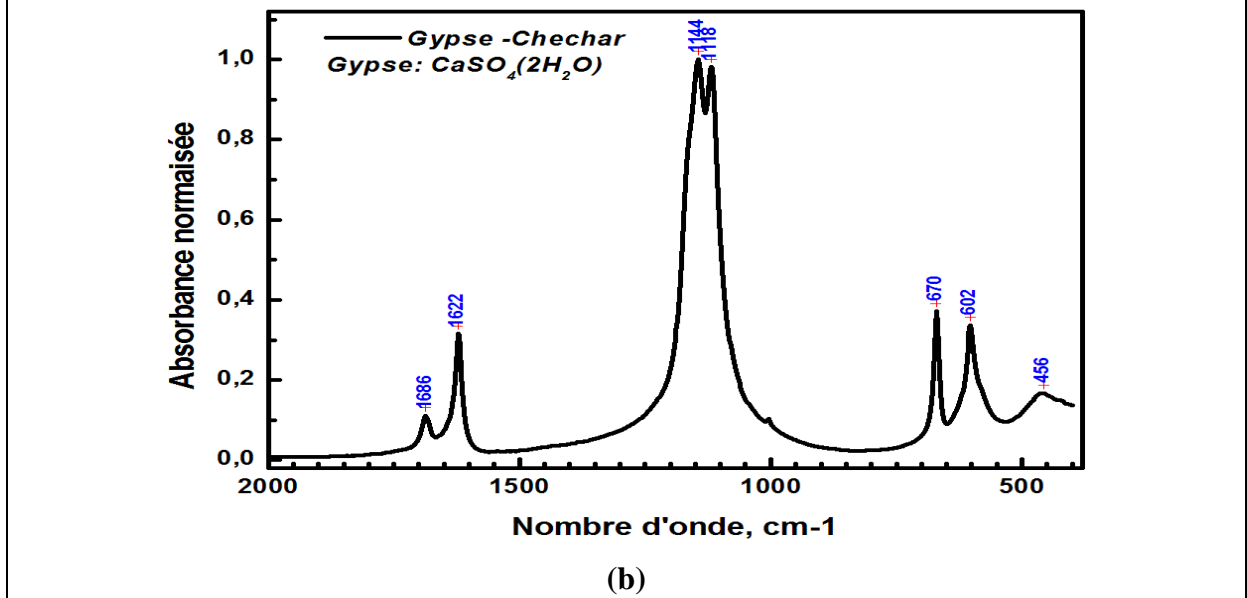


Figure II-18 : Spectre FTIR du gypse dans la partie finger-Print du spectre.

.....

Nous représentons en figure ci-dessous, des spectres pour divers gypse, collectés depuis diverses régions de l'est Algérien (Khenchela-Oum El Bouaghi, et Tebessa).



Chapitre II :

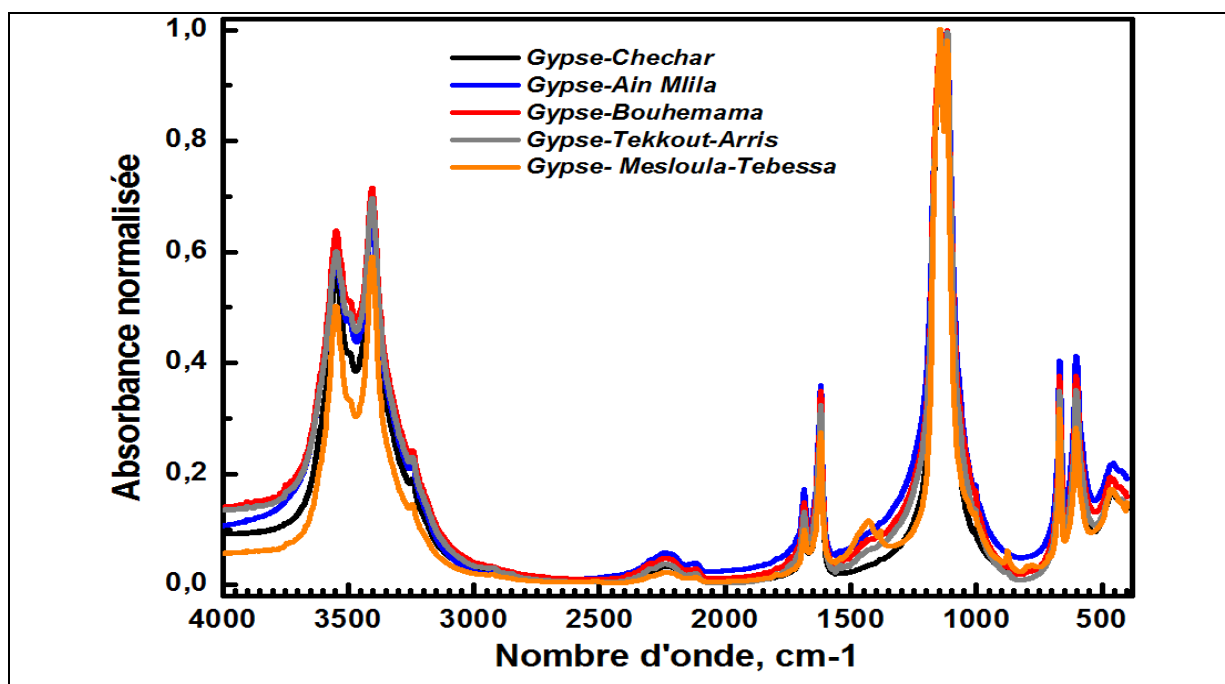


Figure II-19 : Comparaison de divers spectres FTIR du gypse collecté dans diverses régions de l'est-Algérien entre Khenchela et Oum El Bouaghi, et Tebessa.

Le pic vers 1400 cm⁻¹, dans le cas du spectre du gypse de Maslouloula, correspond à la présence d'autres minéraux en plus du gypse (dans ce cas, il s'agirait du sulfate de baryum - appelé la baryte).

On peut donc distinguer les bandes suivantes:

Tableau 4 : Indexation des divers modes obtenus sur le spectre du gypse

Wavenumber value, cm ⁻¹	Mode	Assignement/minéral	References
456	(v)	Oxyde-tel que SiO ₂ Et aussi Sulfate	
602	v ₄ , SO ₄ ²⁻	Gypse	20-21-22-23-24-25- 26-27-28-29-30-31
670	v ₄ , SO ₄ ²⁻	Gypse	
1004	v ₁ , SO ₄ ²⁻	Gypse	
1118	v ₃ , SO ₄ ²⁻	Gypse	
1144	v ₃ , SO ₄ ²⁻	Gypse	
1622	v ₂ , H ₂ O	Gypse	
1686	v ₂ , H ₂ O	Eau	
3244	v ₁ , H ₂ O or	Eau, ou NH ₃	

Chapitre II :

	stretching vibrations of NH_3^+ .		
3406	$\nu_1, \text{H}_2\text{O}$	Eau	
3494	$\nu_1, \text{H}_2\text{O}$	Eau	
3566	$\nu_3, \text{H}_2\text{O}$	Eau	

[Ref 20-21-22-23-24-25-26-27-28-29-30-31]

.....

Les données du tableau 4, et des figures II-17-18-19 montrent tous les modes actifs infrarouges présents dans le spectre infrarouge du gypse.

Des vibrations de sulfate fondamentales se produisent pour l'ion sulfate en raison de vibration d'élongation (étirement) symétrique (ν_1 , 981 cm^{-1}) et asymétrique (ν_3 , 1104 cm^{-1}), et de vibrations de flexion symétriques (ν_2 , 451 cm^{-1}) et asymétriques (ν_4 , 613 cm^{-1}). Une faible absorption se trouve à 1005 cm^{-1} attribuée au couplage des vibrations moléculaires. Un fort doublet est observé aux alentours de 600 et 669 cm^{-1} en raison des vibrations de flexion ν_4 (SO_4)²⁻.

Une bande faible due à ν_1 (SO_4)²⁻ est observée dans de nombreux sulfates avec des configurations de Td déformées près de 950–1000 cm^{-1} et est observée comme épaule près de 1000 cm^{-1} pour le gypse. Les bandes les plus fortes sont dues aux vibrations d'étirement ν_3 (SO_4)²⁻ et sont observées comme un doublet vers 1115 et 1143 cm^{-1} . La vibration de flexion ν_2 ((SO_4)²⁻) est attribuée à la bande proche de 420–450 cm^{-1} . Le spectre IR présente également des caractéristiques d'absorption dans la région 2000–2500 cm^{-1} qui sont attribuables aux harmoniques de premier ordre et aux combinaisons des absorptions ν_3 de (SO_4)²⁻. Le sulfate sous forme d'anhydrite se distingue du sulfate sous forme de gypse par une bande d'absorption à 2210 cm^{-1} qui est moins profonde que la bande d'absorption à 2091 cm^{-1} . Dans le gypse, la bande d'absorption de 2091 cm^{-1} est moins profonde qu'une à 2210 cm^{-1} . Les vibrations ν_3 et ν_1 de l'eau H_2O sont données vers 3620 and 3400 cm^{-1} , mais peut varier en fonction du degré de liaison hydrogène dans le réseau minéral. Les deux vibrations de flexion de l'eau sont observées à 1620 et 1682 cm^{-1} . A weak water-bending overtone ($2\delta^*$ -H-O-H) also occurs near 3200 cm^{-1} . La combinaison et les bandes harmoniques observées à 2846 et 2914 cm^{-1} indiquent la présence d'espèces carbonatées dans l'échantillon.

*Le symbole δ , est aussi utilisé pour les vibrations de déformation (ν_2).

Chapitre II :

1-1. Applications du gypse

Le gypse, comme l'anhydrite, est utilisé pour la fabrication du plâtre, dont la demande est croissante en raison de l'augmentation accrue de la construction immobilière. Par chauffage, on obtient un sulfate héli-hydraté qui après broyage forme un liant qui se réhydrate en gypse au contact de l'eau. Engrais et additif du sol, dans certaines conditions pédologiques. À la fin du XVIIIe siècle et début du XIXe siècle, le gypse de la Nouvelle-Écosse fut particulièrement recherché pour les champs de blé aux États-Unis. Dans certains pays d'Afrique, les artisans travaillent le gypse (surtout les Touaregs) et la pierre de talc. La pierre est sculptée, polie, façonnée. Elle est ensuite fumée ou brûlée pour obtenir la couleur désirée (noire, brune, ...). Elle est enfin gravée pour faire réapparaître le blanc de la pierre originelle. [Ref 32].

Rappelons enfin le tableau suivant

Tableau 5 : divers changements du gypse en fonction de la température

Etat	Gypse	hémihydrate	Anhydrite soluble	Anhydrite insoluble
Formule chimique	$\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{CaSO}_4, 0.5\text{H}_2\text{O}$	$\text{CaSO}_4, 0.5\text{H}_2\text{O}$	CaSO_4
Température de traitement		150°C	200°C	400°C

[Ref 33]

2. Images optiques, données cristallographiques, et analyses FTIR de la baryte

Comme réalisé pour le gypse, nous représentons dans les figures ci-dessous (Figures II-20,.....et jusqu'à la figure II-22) les résultats d'images optiques, de structure moléculaire, de diffractions X, et de spectroscopie FTIR, de ce sulfate.



Chapitre II :

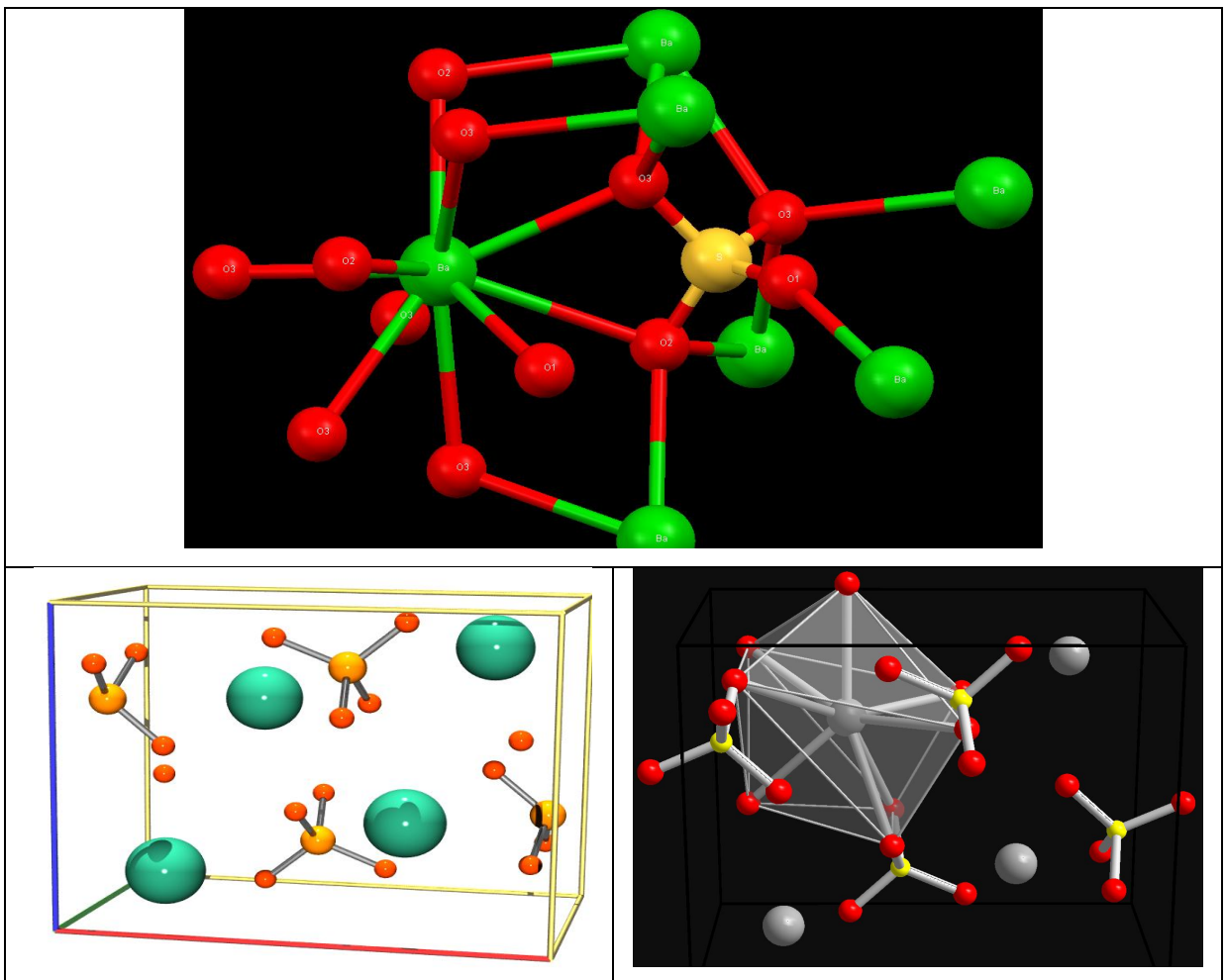


Figure II-20 : Photographies de la baryte roche (baryte massive, et baryte tabulaire), et la poudre de baryte.

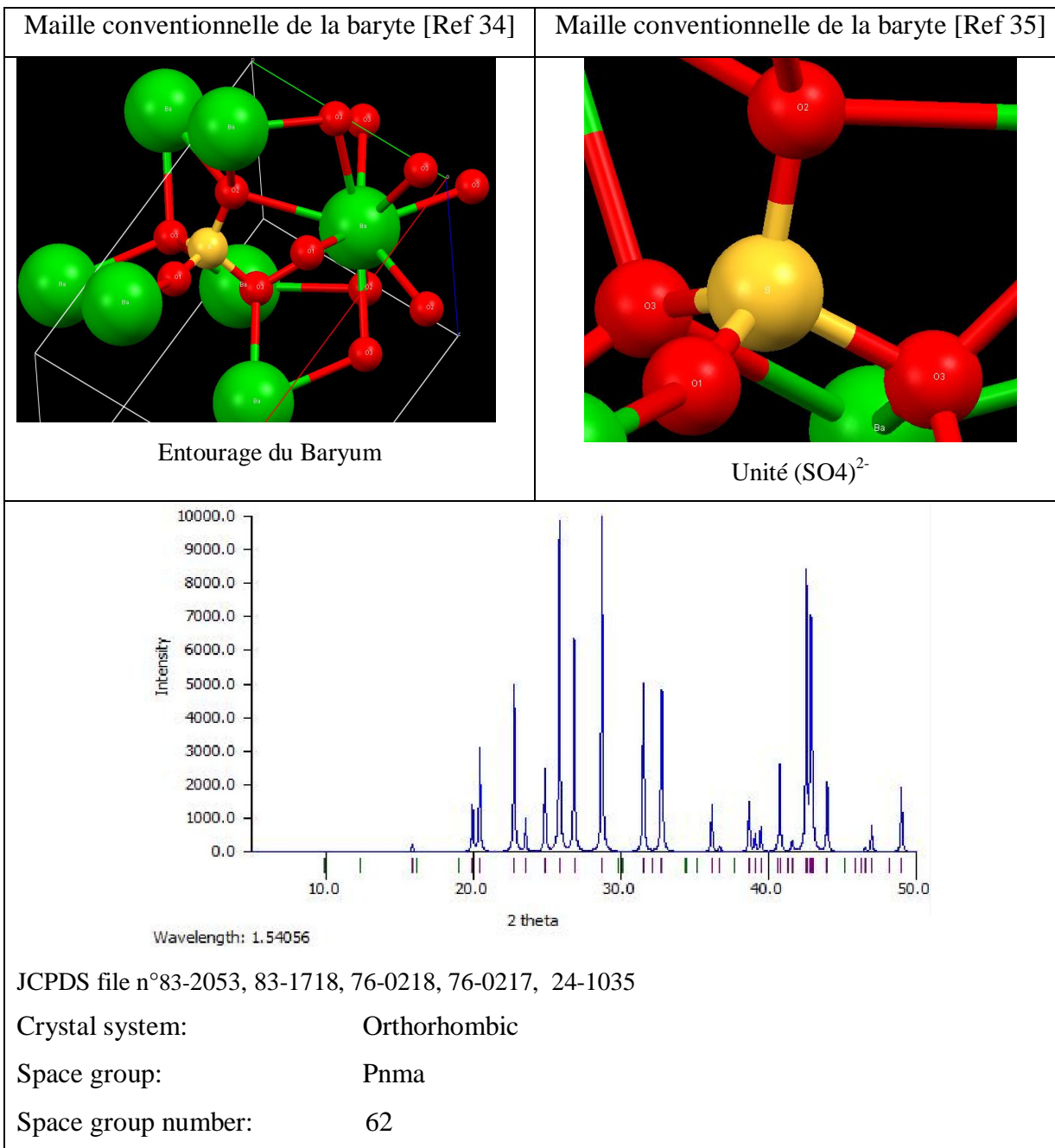
.....

.....

Maille conventionnelle de la baryte, Unité $(SO_4)^{2-}$, et entourage du Baryum.



Chapitre II :



Chapitre II :

Identifier	global
Author(s)	Colville A A, Staudhammer K
Literature Reference	<i>American Mineralogist</i> (1967), 52 , 1877
Formula	Ba O ₄ S
Compound Name	
Synonym	
Space Group	P n m a
Cell Lengths	a 8.884 b 5.458 c 7.153
Cell Angles	α 90 β 90 γ 90
Cell Volume	346.841
Z, Z'	Z : 0 Z' : 0
R-Factor (%)	
Disorder	

Figures II-21:

- Maille conventionnelle de la baryte,
- Spectre DRX de la baryte,
- Fiche de données cristallographiques de la baryte.

[Ref 18-19]

.....

Résultats d'analyses FTIR

.....

--

Chapitre II :

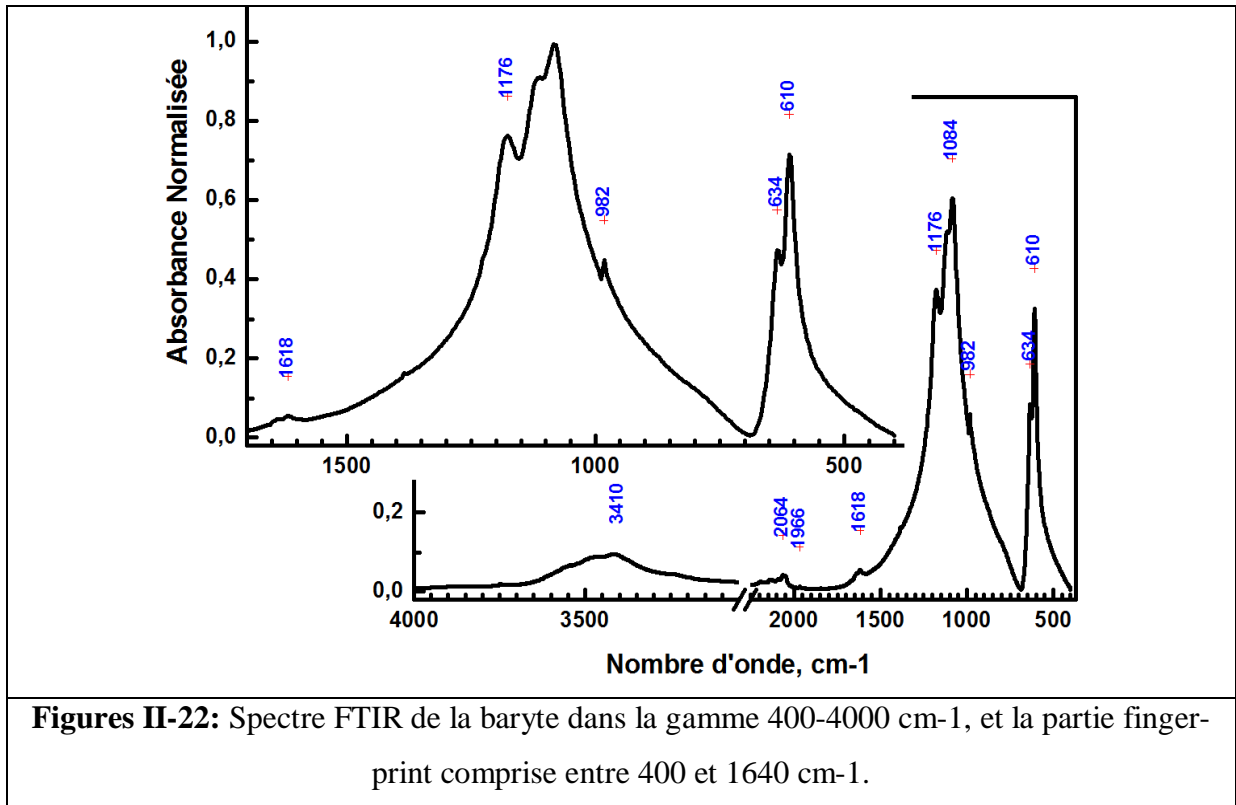


Tableau 6 : Indexation du spectre FTIR de la baryte

474	δ -SO ₄ ²⁻ O-Si-O bending vibrations out-of-plane bending
610-634	vibration of the SO ₄ ²⁻
800	SiO ₂
880	CO ₃ ²⁻ / bonded hydrogen in the H-Si≡O ₃ configuration
982-1084-1180	ν_1 -symmetrical vibration of SO ₄ ²⁻
1417	CO ₃ ²⁻
1634	O-H bending of water molecule.
2059	overtones and combination bands of the lower wave number of sulfur-oxygen stretching and bending vibrations
2850	Symmetric vibrations -CH ₂
2924	Asymmetric vibrations -CH ₃
3445	O-H stretching of water molecule

Ref [36-37-38-39-40-41-42-43-44-45]