

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MENTOURI-CONSTANTINE

FACULTE DES SCIENCES EXACTES

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

N° d'ordre:

Série:

MEMOIRE

Présenté pour obtenir le Diplôme de Magister en Physique

Spécialité: **Sciences des Matériaux**

Option : **Métallurgie**

THEME

*Caractérisation physico-chimique des
Géomatériaux*

PAR

SAMIA KHERFI

Soutenu le :... /... /2012

Devant le jury :

Président :	Prof. D. HAMANA	Université Mentouri - Constantine
Rapporteur :	Prof. M. BOUCHEAR	Université Mentouri - Constantine
Examineurs :	Prof. S. CHEKROUD	Université Mentouri - Constantine
	Prof. C. BOUDAREN	Université Mentouri - Constantine
	Prof. C. BENABBES	Université Mentouri - Constantine

DEDICACES

*Au nom de Dieu le Clément et le Miséricordieux et en termes d'amour et de fidélité,
je dédie ce présent mémoire :*

Aux deux êtres les plus précieux au monde

*Mon **Père** et ma **Mère***

QUE DIEU LES PROTEGE

A ceux qui m'ont entouré et soutenu

*Mes **frères**, mes **sœurs** et à mon très cher frère **Samir***

*Ainsi qu'aux trois familles : **Kherfi**, **Bouzite** et **kerroud** surtout ma grand-mère très chère
zoubida, **Halima** et **Iman***

*Ainsi mon fiancé **Tarik** et toute sa famille*

Toutes mes amies (B.Tafaha, Y. Souad, B. Amel, CH. Sounia, B. Wissam, B. Naima)

Et à tous ceux que j'aime.

Remerciements

J'ai effectué ce travail de mémoire de Magister au Laboratoire de Transformations de Phases, du Département de Physique de la Faculté des Sciences Exactes de l'Université Mentouri-Constantine.

*Ma profonde gratitude s'adresse particulièrement à mon directeur de Mémoire, **Mr le professeur M. BOUCHEAR** pour son encadrement scientifique, son accessibilité, sa grande disponibilité et surtout pour la confiance qu'il m'a témoignée. Qu'il trouve ici l'expression de ma grande reconnaissance.*

*Je voudrais remercier sincèrement **Mr D. HAMANA**, Professeur et Directeur du Laboratoire de transformation de phases du Département de Physique de la Faculté des Sciences Exactes de l'Université Mentouri-Constantine pour m'avoir fait l'honneur de présider mon jury de Mémoire, je lui adresse mes sincères remerciements.*

*Je remercie **Mr S. CHEKROUD**, Professeur au Département de Physique et Vice-recteur chargé de la post-graduation, de l'habilitation et de la recherche scientifique à l'Université Mentouri-Constantine, qui a bien voulu accepter de faire partie du jury et d'examiner mon travail malgré ses énormes charges pédagogiques et administratives.*

*Je remercie également **Mr C. BOUDAREN**, Professeur au Département de Chimie à l'université Mentouri de Constantine et **Mr C. BENABBES**, Professeur au Département géologie à l'université Mentouri de Constantine pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de juger ce travail.*

*Je remercie toutes les équipes du laboratoire de géologie et environnement (LGE), particulièrement le directeur de ce laboratoire, le professeur **Mr C. BENABBES**, **Mme D. AIT ABDELOUAHAB** ainsi que **Melle O. LAAZIZ**, enseignants-chercheurs au département de géologie de l'université Constantine.*

*Je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, mes sincères gratitudes vont à **Mme M. BENGUEDOUAR**, enseignante-chercheur du même laboratoire LTPH du département de physique de l'université de Constantine pour m'avoir*

assisté dans ce travail, et pour tout le temps qu'elle m'a consacré, mais également pour sa gentillesse, sa générosité, je la remercie Beaucoup.

*Je remercie **Mr A. BOUZENOUNE**, Professeur à l'université de Jijel et directeur du laboratoire du génie géologique, et monsieur A. **Benayad** technicien au laboratoire de génie géologique pour leurs aides précieuses.*

*Je remercie **Mr H. BOUNIBE** Professeur à l'université de Jijel département de génie civil président de de laboratoire des essais mécaniques et **Mr A. KHADIME –ALLAH**, Ingénieurs au sein du même laboratoire Pour leur aide lors des essais de microdureté.*

*Je remercie toute l'équipe du département du génie des procédés présidée par le Professeur **Mr R. KETRANE** de l'université Abderrahmane Mira de Bejaia pour son aide pour les essais de diffraction X et observations en microscopie électronique à balayage.*

*Je remercie aussi **Mr S. ACHOUR** professeur au département de physique de l'université de Constantine, Directeur du laboratoire de céramique et Monsieur **R. BOUDCHICHA** enseignement au département de physique de l'université de Skikda, pour leur collaboration.*

Je remercie également l'ensemble des membres du laboratoire pour leur gentillesse et leur soutien : Melle L. CHETIBI, Melle Z. BELAMRI, Melle L. BOUMAZA, Mme L. AMIOUR, Mme A. AZIZI, Melle H. DJAABOUB, Mr B. RAHAL, Melle D. FAR, Mr A. MOUATSI, Ingénieure de ce laboratoire ... et à toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail au niveau du laboratoire de transformations de phases.

Je remerciement tous mes amis du Département de Physique, spécialement : D. Sabrina, B. khalida, D. Affia, M. Fatima, B. Nadjat, S. charafe eddine, T. Adel, D. Djemel et mes amies de la cité universitaire K. Hoda, D. Radia , B. Fatima Zohra, B. Samia et D. Widad.

SOMMAIRE

<i>INTRODUCTION GENERALE</i>	01
<i>CHAPITRE I : ETUDE GENERALE SUR LES GEOMATERIAUX</i>	03
I. INTRODUCTION	03
II. LES ROCHES ET LEURS DIFFERENTS TYPES	04
III. LES MINERAUX	14
IV. LE CYCLE DES ROCHES	19
V. QUELQUES EXEMPLES DES MINERAUX ET ROCHES	19
VI. PROPRIETES DES GEOMATERIAUX	24
<i>CHAPITRE II : ORIGINES DES MATIERES PREMIERES</i>	29
I. HISTORIQUE DES TRAVAUX DE RECHERCHES GEOLOGIQUES ET MINIERES	29
II. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE DE DJEBEL EL OUAHCH ET DJEBEL KELLAL	31
III. LOCALISATION DES MATIERES PREMIERES	33
<i>CHAPITRE III : DOMAINES D'APPLICATIONS DES CALCAIRES ET DES ARGILES</i>	37
I. INTRODUCTION	37
II. HISTOIRE DE L'UTILISATION DES ROCHES	37
III. LES ARGILES ET LA ROCHE CALCAIRE - MATERIAUX ET APPLICATIONS	38

CHAPITRE IV : ELABORATION ET PREPARATION DES	
ECHANTILLONS PRELEVES ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES	50
I. INTRODUCTION	50
II. MATIERES PREMIERES LOCALE	50
III. METHODE D'ELABORATION DES ECHANTILLON	52
IV. TECHNIQUES EXPERIMENTALES UTILISEES	59
CHAPITRE V : RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATIONS	68
I. ETUDE PAR LA DIFFRACTION DES RAYONS X	68
II. ETUDE PAR MICROSCOPE ELECTRONIQUE A BALAYAGE	72
III. ETUDE PAR MICROSCOPE OPTIQUE	74
VI. ETUDE PAR MESURES DE MICRODURETE HV	82
V. ETUDE PAR MESURES DE POROSITE	84
VI. ETUDE DE LA TENEUR EN EAU	87
CONCLUSION GENERALE	88
REFERENCES	90

INTRODUCTION

L'histoire des matériaux de construction, comme celle de la métallurgie, de la verrerie, des matériaux céramiques, remonte à plusieurs millénaires. Son apparition précoce et son développement sont liés aux ressources offertes par la géologie, notamment aux matières premières nécessaires à ces premières manifestations de l'industrie humaine, qui doivent être largement disponibles, peu onéreuses, faciles à exploiter et à transporter. Ces matières premières consistent principalement en matériaux dits de "carrière": pierres et granulats, sables, calcaires, argiles, gypses, feldspaths,... qu'ils soient exploités à l'air libre ou en souterrain.

Les géomatériaux intéressent un grand nombre d'industries surtout ces dernières années non seulement en Algérie mais dans le monde entier.

Parmi ces substances utiles, les calcaires qui se présentent soit sous forme pure (Constitués essentiellement de CaCO_3) utilisés dans le secteur industriel comme additif : produit de peinture, papeterie, enduits, caoutchouc ...etc. Soit sous forme d'agrégats quand ces calcaires contiennent d'autres éléments que le CaCO_3 (le pourcentage de CaCO_3 reste important). Ces calcaires sont utilisés dans le béton Hydraulique et les travaux publics, l'argile pour fabriquer la brique.

Pour cette étude on a utilisé plusieurs méthodes expérimentales : la diffraction des rayons X, les mesures de microdureté, l'observation microscope électronique à balayage et microscope optique et la mesure de porosité.

Une caractérisation physico-mécanique a été effectuée afin de bien connaître les roches du point de vue de leur constitution minéralogique, de la morphologie de leurs milieux poreux.

L'étude des roches et des minéraux se veut une introduction générale à la géologie. L'examen des différents types de roches et de minéraux que l'on retrouve dans l'écorce terrestre, nous renseigne sur leurs caractéristiques ainsi que leurs propriétés physiques chimiques ou mécaniques et déterminent l'usage qu'en font les humains.

Le travail de recherche présenté dans ce mémoire concerne deux pierres de construction qui ont été choisies à titre d'exemples pour montrer la nécessité d'une étude approfondie visant à bien distinguer deux pierres dont les caractéristiques principales sont très différentes : le calcaire (blanc et gris) et l'argile. En effet, la principale phase existante dans les calcaires (blanc et gris)

est la calcite CaCO_3 (carbonate de calcium), appartenant au système rhomboédrique. La pierre argile étant un phyllosilicate, sa principale caractéristique est que c'est une roche très friable.

Dans ce travail, nous présentons une étude physico-mécanique de géomatériaux calcaire (blanc et gris) et argile. Deux matières premières d'origine locales très abondante. La première se trouve à dans la région de djebel kellal et la deuxième dans la région de djebel ouahch à wilaya de Constantine.

Notre choix s'est basé sur ces deux matériaux à cause de leurs excellentes propriétés mécaniques, physiques et chimiques qui permettent leurs applications en construction.

Notre intérêt porte sur la caractérisation des échantillons élaborés par différentes expérimentales à savoir :

- La diffraction des rayons X, DRX.
- Microscopie électronique à balayage, MEB.
- Microscopie optique, pour l'observation on a préparation des lames minces.
- Mesure de la microdureté.
- Mesure de la porosité à l'eau.
- Mesure du taux d'humidité.

En plus d'une introduction, d'une conclusion générale et une liste des références bibliographiques, le mémoire est structuré en cinq chapitres :

- le premier chapitre concerne l'étude générale sur les géomatériaux ;
- le deuxième chapitre traite l'origine des matières premières : le calcaire blanc, le calcaire gris et l'argile respectivement de djebel kellal et djebel ouahch de la wilaya de Constantine ;
- dans le troisième chapitre, nous présentons les domaines d'application des roches calcaires et argiles ;
- le quatrième chapitre décrit l'élaboration des échantillons et les techniques expérimentales de caractérisation des matières première par différentes techniques d'analyses ;
- enfin dans le cinquième et dernier chapitre, on présente les résultats expérimentaux obtenus et leurs interprétations.

CHAPITRE I
ETUDE GENERALE SUR LES
GEOMATERIAUX

CHAPITRE 1**ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE GENERALE****SUR LES GEOMATERIAUX****I. INTRODUCTION**

La Terre est une planète géologiquement vivante. Aujourd'hui encore, en profondeur, des magmas élaborent les roches éruptives qui apparaîtront à la surface de notre globe dans quelques dizaines de millions d'années. Les volcans crachent les laves qui forment de nouvelles roches volcaniques. Sur les continents, l'érosion poursuit la destruction des reliefs, fournissant le matériel nécessaire à la formation de nouvelles roches sédimentaires. Dans les profondeurs des continents, la chaleur, la pression et les infiltrations hydrothermales modifient continuellement les roches en les métamorphisant. Inlassablement, depuis 4 milliards et demi d'années, la matière minérale est modelée, transformée, détruite puis utilisée à nouveau pour élaborer de nouvelles roches. Le mécanisme qui anime cette activité géologique est la chaleur. C'est celle qui est encore stockée dans les profondeurs de notre planète et à laquelle s'ajoute celle dégagée par la radioactivité naturelle des roches granitiques. Cette chaleur interne est le moteur qui déplace les continents, construit les chaînes de montagne, génère les magmas et produit le métamorphisme. Il ne faut pas oublier non plus l'énergie solaire qui est responsable de la destruction des reliefs, de la formation des roches sédimentaires et rend possible l'existence de la vie, elle-même génératrice des roches organogènes [1].

La presque totalité de notre planète est constituée de roches et de minéraux (la montagne, le fond des mers, la terre, l'eau, le sable...). Il en existe de nombreuses sortes et nous en utilisons chaque jour sans même nous en rendre compte. Ces roches et minéraux ont été transformés et ils ont changé de forme et d'aspect. Depuis le commencement de l'histoire de l'humanité, on utilise les roches et les minéraux de façon incontournable pour le développement des sociétés (âge de la pierre, âge du bronze, âge du fer...) [2].

Toutes les études ont conduit les géologues à subdiviser l'ensemble des roches sédimentaires en quatre grandes ères dont les limites correspondant à la disparition rapide de nombreuses espèces vivantes et l'apparition de nouvelles espèces. Celles-ci se subdivisent à

leur tour en périodes géologiques: Carbonifère, Trias, Jurassique par exemple. Ces grandes divisions sont reconnaissables sur l'ensemble de la Planète .Régionalement, les périodes géologiques se subdivisent à leur tour en époques puis en étages géologiques. L'énergie solaire est responsable de leur formation C'est l'énergie solaire qui est le moteur du cycle érosion/sédimentation, par le biais des précipitations, du ruissellement et de l'action mécanique des cours d'eau. L'énergie solaire nous parvient sous la forme d'un rayonnement électromagnétique comprenant des rayons ultraviolets, de la lumière visible et un rayonnement infrarouge. Le tiers de ce rayonnement est directement réfléchi vers l'espace par les 2 nuages, les neiges et les glaciers. La quantité restante est considérable. C'est l'énergie solaire qui est responsable de nos climats. Les régions proches de l'équateur reçoivent plus de chaleur qu'elles n'en émettent, alors que les régions polaires sont dans la situation inverse. Pour compenser ce déséquilibre il y a transfert de chaleur des régions équatoriales vers les régions septentrionales par l'entremise des vents dominants et des courants marins. Le cycle évaporation-précipitation en est une des manifestations les plus tangibles. Il est indirectement responsable de l'altération des roches, de la destruction des reliefs montagneux et de la formation des roches sédimentaires [1].

L'étude de ces roches et minéraux est une science qui s'appelle la géologie, et on peut définir et expliquer les roches et les minéraux dans les prochains paragraphes.

II. LES ROCHES ET LEURS DIFFERENTS TYPES

Selon leur mode de formation, on distingue trois grandes familles de roches :

II.1. Les roches magmatiques

Elles sont formées par la solidification de magmas et classées en fonction de leur mode de mise en place, de leur composition minéralogique et de leur composition chimique. On distingue en fonction du mode de solidification :

- les roches volcaniques ou extrusives qui se solidifient en surface, composées de cristaux et de pâte peu ou pas cristallisée ;
- les roches plutoniques ou intrusives qui se solidifient en profondeur, composées uniquement de cristaux [3 -5].

Un magma est un liquide visqueux fait de roches fondues, charriant souvent une certaine quantité de cristaux déjà formés et renfermant une certaine quantité des gaz dissous. Sa température est comprise entre 700° et 1400°. Chimiquement, c'est une solution complexe de silicates d'aluminium, de sodium, de potassium, de calcium, de fer et de magnésium, renfermant aussi de petites quantités d'eau et de CO₂. La teneur en silice (SiO₂) varie entre 72% pour les magmas granitiques et un peu moins de 50% pour les magmas basaltiques (tableau 1) [1]. La diminution de la teneur en silice s'accompagne d'une augmentation du pourcentage de calcium et des éléments ferromagnésiens au détriment du potassium et du sodium [1].

Malgré les températures élevées qui règnent dans les profondeurs du globe, les roches ne sont que très rarement à l'état fondu, car l'augmentation de la pression avec la profondeur entraîne aussi l'élévation de la température de leur point de fusion.

Cependant, dans certaines régions de l'écorce terrestre, à des profondeurs comprises entre 100 et 150 km (manteau supérieur), là où la température est très proche du point de fusion, une fusion partielle des roches peut parfois se produire dans des zones où, pour des raisons encore mal connues, la température est plus élevée qu'ailleurs [1].

La fusion dans ces roches est partielle, ce sont les parties les plus facilement fusibles de la roche qui fondent, fractionnant la roche en un liquide, le magma, et un résidu réfractaire solide. Ce n'est généralement qu'une faible fraction de la roche qui fond et la partie qui demeure à l'état solide reste importante. Il est évident que la fusion est d'autant plus complète que la température est plus élevée. Si la fusion est totale, la composition du magma est la même que celle de la roche originelle. En revanche, il n'en va pas de même lorsque la fusion n'est que partielle: le magma présente alors la composition chimique des éléments les plus fusibles de la roche originelle. On observe une tendance générale des magmas à évoluer vers deux pôles: les magmas granitiques et les magmas basaltiques. Une fusion partielle du manteau supérieur donne naissance aux magmas basaltiques, alors que la fusion partielle de la croûte océanique entraînée le long d'une zone de subduction génère des magmas de nature granitique. La fusion partielle des roches peut également se produire dans des zones beaucoup moins profondes, au sein même de la croûte continentale, comme aboutissement final d'un métamorphisme très intense. Les magmas sont alors généralement de nature granitique [1].

Deux tendances : magmas granitiques ou basaltiques			
Composition du magma	Origine du magma	Teneur en silice	Température de fusion
Granitique	fusion partielle de la croûte océanique ou continentale	env. 70 %	700°- 800°
Basaltique	fusion partielle du manteau	env. 50 %	>1000°

Tableau 1 : Magmas granitiques et magmas basaltiques [1].

II.2. Les roches sédimentaires

Issues de l'accumulation, puis de la consolidation des produits de l'érosion, le plus souvent dans des bassins marins ou lacustres : les conglomérats (figures 1 et 2).



Figures 1 et 2 : Conglomérat [1].

Comme leur nom le laisse deviner, les roches sédimentaires sont la conséquence de l'endurcissement de sédiments accumulés en milieu lacustre, marin ou aérien. Les sédiments sont les débris, sous toutes leurs formes, des processus de l'érosion qui inlassablement attaquent et détruisent les terres émergées. Au sens large, cela comprend aussi les sédiments

formés par des processus chimiques et biologiques à partir de matériel en solution dans les lacs et les océans [1, 6].

Suivant leur mode de formation, on distingue trois grandes catégories de roches sédimentaires:

- les roches détritiques, provenant de l'accumulation des débris de roches préexistantes ;
- les roches organogènes, formées par l'accumulation des restes d'animaux ou de plantes, principalement à squelette calcaire ;
- les roches biochimiques, issues de la précipitation de substances chimiques en solution dans l'eau des lacs ou des océans [1].

II.2.1. Les roches détritiques

Elles sont classées selon la taille de leurs constituants. On distingue :

- les conglomérats, constitués des éléments les plus grossiers (blocs, cailloux, graviers), liés par un ciment ;
- les grès, constitués de sables liés par un ciment. On précise alors la nature du ciment - grès à ciment-calcaire, à ciment-ferrugineux, ou le degré de finesse des éléments: grès grossier, grès fin etc... ;
- les silts et les schistes argileux sont constitués des éléments les plus fins, limon et argile. Les constituants les plus habituels des roches détritiques sont le quartz, les débris de roches, les feldspaths, les micas et les minéraux argileux [1, 6].

II.2.2. Les roches organogènes et biochimiques

Ces roches sont le produit des activités de la biosphère ou de la précipitation chimique de substances dissoutes dans les eaux des lacs ou des océans. L'accumulation des squelettes d'organismes qui peuplent les lacs et les océans produit les roches organogènes. Ces squelettes sont le plus souvent formés de calcite (CaCO_3), beaucoup plus rarement de silice SiO_2 . Les processus biochimiques responsables de la formation des roches du même nom sont très divers. Ce sont les dépôts de sel provoqués par l'évaporation de l'eau de mer dans les bassins fermés, les encroûtements qui accompagnent les résurgences thermales, ou

encore les échanges chimiques dans les sédiments non encore consolidés. Mentionnons en particulier les évaporites, ces dépôts issus de l'évaporation d'eau de mer ou de lacs salés. Ceux qui nous sont les plus familiers sont les dépôts de sel gemme (halite ou sel de cuisine), d'anhydrite et de gypse. Les évaporites ne sont pas uniquement le produit d'un processus purement chimique mais, pour elles aussi, l'intervention des micro-organismes favorise la précipitation de certains minéraux, bloque ou ralentit la précipitation des autres. Les évaporites se forment de préférence dans des mers intérieures telles la mer Morte ou la mer Caspienne, et dans des lacs salés, tel le lac Natron en Tanzanie. Elles se forment aussi dans les lagunes côtières séparées de la haute mer par des goulets peu profonds. Bien que les minéraux des évaporites soient solubles dans l'eau, on en trouve des accumulations importantes dans des roches de toutes les époques. Elles ont résisté au temps grâce à la protection de roches argileuses imperméables qui les ont recouvertes [1, 7].

Il se trouve que les calcaires qui sont des roches sédimentaires d'origine souvent organogène, nécessitent une étude approfondie.

II.2.3. Les différents types de calcaires

a) Les calcaires

Les calcaires sont des roches sédimentaires. Elles présentent ainsi les marques de la sédimentation, la présence de coquillage et autres concrétions visibles à l'œil nu. La pierre calcaire est claire avec différentes nuances de teinte, issues de son origine mais aussi des veines de taille. Cette particularité apporte, à sa mise en œuvre, différentes nuances, très significatives du calcaire. Ce matériau est très peu poreux. Les finitions appliquées sur le calcaire, lisses ou rugueuses, sont principalement mécaniques ou thermiques. Elles ont pour objectif de mettre en valeur la pierre, les lits de sédimentation, les concrétions...

Cependant, sa surface et son traitement s'usent avec le temps aux passages des usagers, ce qui rend le matériau lisse à terme. Il est possible d'obtenir toutes sortes de dimensions (bordures, bornes, cadettes...). Cependant, la taille des bordures calcaires doit suivre le sens de sédimentation pour conserver la résistance du matériau. Certaines concrétions ou veines peuvent créer une fragilité dans le module en fonction de sa position.

De manière générale, le calcaire est moins résistant aux chocs que le granit. La pierre calcaire étant un matériau issu de strates successives de sédimentation, la pose doit respecter ces strates sous peine d'un délitage rapide de la pierre [1, 8].

Ce sont les calcaires qui constituent la plus grande partie des roches organogènes. Ils sont presque entièrement constitués de calcite (CaCO_3). De teinte généralement claire, blanc à jaunâtre, ils deviennent gris bleuté s'ils renferment un peu d'argile, alors qu'un peu de fer à l'état oxydé les colore en jaune brun. Ils forment dans la nature des bancs compacts plus ou moins épais. On identifie les calcaires en leur appliquant une goutte d'acide (le jus de citron ou le vinaigre conviennent aussi) qui produit alors une légère effervescence due au dégagement de CO_2 . Les calcaires se forment dans les mers peu profondes, chaudes ou tempérées, là où les micro-organismes sont abondants. Au-delà d'une certaine profondeur, les organismes calcaires sont dissous. Les calcaires peuvent renfermer une proportion importante de sédiments détritiques et former des roches mixtes : ainsi la présence de grains de quartz contribue à former des calcaires gréseux alors qu'une proportion notable de calcaire dans les grès aboutit à des grès calcaires. Il en est de même des minéraux argileux qui, en proportion croissante, forment les calcaires argileux (5 à 35% d'argile), les marnes (35 à 65 % d'argile), les argiles calcaires (65 à 95% d'argile). La craie est un calcaire à grain très fin, poreux et friable, tachant les doigts, constitué par l'accumulation d'algues calcaires microscopiques (figure 3) [1].



Figure 3 : Ammonite dans un calcaire [1].

La figure 4 présente l'aspect morphologique de la surface de certains calcaires étudiés par K. Besnard dans le cadre d'un DEA en hydrologie à l'université Pierre et Marie-curie [9].

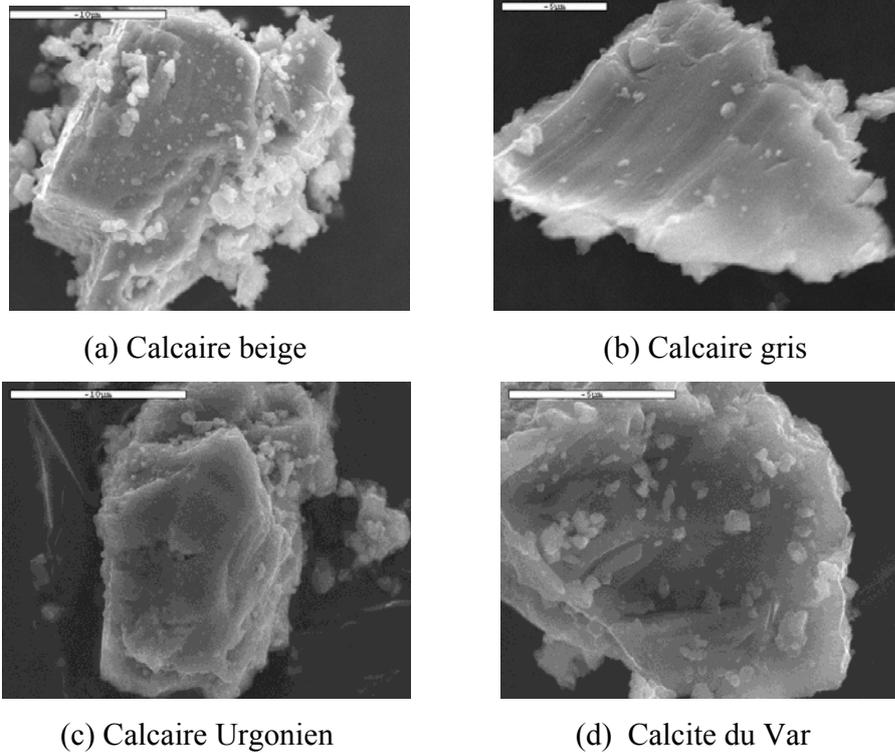


Figure 4 : Micrographies MEB - Etat de surface initial des 4 calcaires [9].

Dans le tableau 2 [9], on peut avoir une idée générale sur la composition minéralogique des calcaires. On note que la composition chimique des calcaires étudiés, montre qu'ils contiennent essentiellement de la calcite, très peu de quartz, matières organiques.....

Calcaire	Composition chimique
Calcaire Urgonien	+ de 99,5% de calcite un peu de quartz
Calcaire beige	99% de calcite quartz
Calcaire gris	97,5% de calcite quartz Matière organique
Partie marneuse	Calcite Quartz Argile : kaolinite, illite (?) Pyrite Matière organique
Calcite du Var	Calcite Quartz Phase carbonatée contenant du fer

Tableau 2 : Bilan des analyses chimiques des différents types de calcaire [9].

b) les dolomies

Ce sont des roches constituées de cristaux de dolomite $(Ca, Mg)CO_3$. Contrairement au calcaire, la dolomie ne réagit pas à froid avec l'acide chlorhydrique. Les dolomies ont souvent une patine beige. Elles forment dans les Alpes d'imposants massifs ruiniformes qui font le bonheur des alpinistes. On trouve tous les termes de passage entre une dolomie pure et un calcaire : dolomie, dolomie calcaire, calcaire dolomitique et calcaire (figure 5).

L'origine des dolomies est restée longtemps problématique car aucun processus d'évaporation n'est capable d'aboutir à des dépôts de couches dolomitiques et, Par ailleurs, on ne connaît aucun micro-organisme à squelette dolomitique. Ce n'est que récemment qu'on a découvert le mécanisme de leur formation. C'est la circulation de l'eau de mer à travers des dépôts de boues calcaires perméables qui transforment lentement la calcite en dolomite.

Cette transformation, qui est le résultat d'un échange d'ions entre le calcium et le magnésium, s'opère au cours de la diagenèse, dans des conditions de température qui correspondent déjà à une certaine profondeur d'enfouissement des sédiments [2].

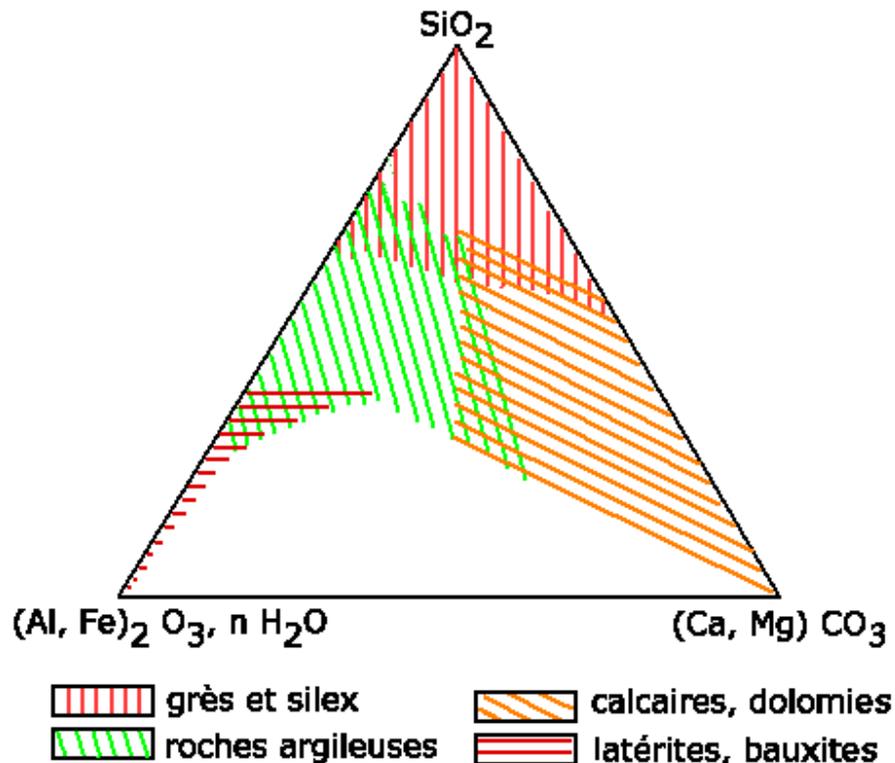


Figure 5 : Composition des principaux groupes de roches sédimentaires.
La zone inférieure blanche correspond à des compositions rares ou inconnues [10].

II.3. Les roches métamorphiques

L'origine de ces roches peut être des deux types précédents, mais avec des conditions de pression et de température élevées qui changent la nature de la roche d'origine, c'est le cas de schiste ou marbre [11].



Figure 6 : Schiste [1].

Lorsqu'une roche est soumise à une augmentation de pression et de température, soit à la suite d'un enfouissement profond sous d'autres roches, soit qu'elle ait été exposée aux effets calorifiques de la proximité d'une intrusion magmatique, elle subit une transformation que les géologues appellent métamorphisme. L'aspect de la roche change et un nouvel assemblage minéralogique apparaît au détriment de celui qui existait auparavant. L'ensemble de roches qui ont subi les effets du métamorphisme constituent les roches métamorphiques.

On distingue deux types de métamorphisme :

- le métamorphisme régional, provoqué par une augmentation de pression et de température sans modification globale importante de la composition chimique ;
- le métamorphisme de contact, limité dans l'espace à la proximité d'une intrusion magmatique, marqué principalement par une augmentation de la température sans augmentation de pression et par des apports chimiques silicatés provenant du magma.

Toutes les roches, quelle que soit leur origine, sont susceptibles de subir les effets du métamorphisme à un moment quelconque de leur évolution.

L'enfouissement des roches peut être le fait de l'accumulation d'épaisseurs considérables de sédiments dans un bassin de sédimentation ou celui de la superposition de nappes de plis lors de la formation de chaînes de montagnes [1, 12].

La plupart des roches métamorphiques ont un aspect feuilleté que les géologues nomment schistosité. La texture est alors caractérisée par une orientation préférentielle des minéraux, dont l'aplatissement ou l'allongement se développent dans une même direction,

faisant apparaître ainsi l'aspect schisteux propre à de nombreuses roches métamorphiques. Ce sont les pressions orientées qui provoquent la schistosité, en particulier celles qui prédominent au sein des chaînes de montagne en formation [1].

III. LES MINERAUX

Un minéral est une substance inorganique ou non vivante contrairement aux plantes et aux animaux qui sont organiques. Un minéral est composé d'un élément chimique ou d'un ensemble de plusieurs éléments. Ce sont des substances solides qui apparaissent naturellement dans la croûte terrestre et qui peuvent avoir différentes formes. Il existe cependant des minéraux liquides : l'eau, le pétrole et le mercure [2].

III.1. Origine des argiles et leurs différents types

On désigne par le mot "argile", soit une famille de différents minéraux, soit une roche formée pour l'essentiel de ces minéraux. Les minéraux argileux sont des phyllosilicates hydratés, se présentant en très petits cristaux (quelques micromètres) et dont la structure est caractérisée par la superposition de feuilletés composés de couches tétraédriques (tétraèdre d'atomes d'oxygène avec un atome de silice au centre) et de couches octaédriques (octaèdre d'atomes d'oxygène avec un atome d'aluminium au centre) [13].

Ces minéraux forment un groupe important et complexe d'espèces minérales voisines souvent associées dans les gisements (kaolinite, illite, glauconite, smectite, vermiculite), d'autant que des formes mixtes (les interstratifiés, comme l'illite-montmorillonite ou l'illite-chlorite) sont fréquentes.

Les argiles proviennent toutes de la décomposition de minéraux silicatés qui forment les roches. Cette décomposition appelée aussi altération est réalisée par les agents atmosphériques et principalement l'eau. Les acides organiques produits par l'activité biologique accentuent ce phénomène d'altération. Certains silicates d'alumine donnent des argiles par simple transformation : par exemple les micas en s'hydratant peuvent donner des illites. On les appelle argiles transformées. Ces argiles participent à un cycle pédologique à la fin duquel elles sont entraînées par l'érosion et vont rejoindre des zones de sédimentation. Elles peuvent alors être piégées dans des roches sédimentaires comme les marnes (argiles

calcaires) ou des grès (psammites). Lorsque ces roches reviennent à la surface des continents, elles se décomposent en donnant des argiles appelées alors argiles héritées. Lorsque l'altération continentale est puissante, les minéraux silicatés sont totalement décomposés et l'eau entraîne la silice, l'alumine, le fer et d'autres éléments comme les bases ou les métaux. Ces éléments en solution peuvent se recombinaer et donner naissance à des argiles dites de néoformation (exemple : smectites, kaolinite...). Cela peut se produire dans le sol, dans le sous-sol ou dans l'eau stagnante. Il y a environ quinze cents variétés d'argiles sur la planète [14].

Nous allons ici aborder les types d'argile. Toutes sont des silicates hydratés d'alumine à structure en feuillet. La Kaolinite appelée souvent "argile blanche" tire son nom de la région de Chine où elle fut découverte (Kao-Ling) pour la fabrication de la porcelaine. C'est une argile phylliteuse à deux couches contenant principalement de la silice 48 % et de l'alumine 36,5 %, elle dispose d'un fort pouvoir couvrant.

Elle neutralise les excès d'acidité ou d'alcalinité par régularisation du pH. Elle active les mécanismes de la cicatrisation. Ses capacités d'absorption (passage de substances nutritives depuis l'extérieur dans une cellule) et d'adsorption (pénétration superficielle d'un gaz ou d'un liquide dans un solide) sont bonnes, c'est une argile surfine.

L'Illite (nom qui vient de "l'Illinois") Association d'un feuillet O (alumineux) et deux feuillets T (Siliceux) [14]. est une argile assez commune notamment dans les sols. C'est une argile à trois couches, dérivant des micas blancs, elle est potassique et alumineuse. Son pouvoir d'adsorption est moyen car sa surface développée est "moyenne". Sa couleur varie du gris blanc au brun clair selon la teneur en impuretés métalliques. Elle est composée essentiellement de silice (36,5 %), faiblement dosée en alumine (environ 9 %), à tendance calcique (près de 14 %) et riche en fer (près de 9 %). Elle est de toutes les argiles celle dont le pouvoir d'adsorption est le plus faible. La Montmorillonite, argile verte ou "Argile verte de Provence, est extraite de la mine de Mormoiron dans le Vaucluse (d'où son nom). Les montmorillonites sont des argiles gonflantes : constituées de trois couches, elles ont la possibilité de modifier l'espace entre les couches par absorption d'eau. Elles ont le plus haut pouvoir fixateur connu chez les argiles. Il en existe des variétés assez nombreuses de couleurs différentes en raison de la présence de métaux. La montmorillonite est une argile phylliteuse à trois couches à forte concentration en silice (48,25 %), bien équilibrée dans sa

composition minérale (alumine 11,17 %, magnésium 9,66 %, fer 3,90 %, potassium 3,03 %...calcium, phosphore, sodium, cuivre, zinc, sélénium, cobalt, manganèse).

C'est l'argile la plus complète quant à ses propriétés thérapeutiques grâce à un très fort pouvoir adsorbant. Sa région d'extraction et son séchage au soleil provençal lui confèrent certainement une valeur énergétique supérieure à celle des autres argiles en raison de la capacité des minéraux argileux à capter l'énergie pour la restituer. On la trouve sous plusieurs formes, en morceaux (concassée) ou en fine poudre.

Les smectites sont utilisées pour absorber des graisses ou des liquides qu'elles inhibent.

La Bentonite est un mélange naturel de plusieurs argiles gonflantes associées à de très fines particules de quartz ou d'hydroxydes colloïdaux. C'est pourquoi leur couleur varie du blanc crème au brun, voire au gris foncé. Ces propriétés particulières – viscosité, plasticité, retrait-gonflement, pouvoir liant – découlent de leur structure cristalline en feuillets. La plupart des bentonites naturelles sont des bentonites calciques, les bentonites sodiques étant très rares. On transforme souvent les bentonites calciques en bentonites sodiques artificielles (par ajout de carbonate de sodium), qui ont de meilleures caractéristiques. Les bentonites calciques sont utilisées pour le dégraissage de la laine (terre à foulon) et comme absorbants, dans les sols et les litières animales. On trouve en quantités variables une grande variété d'oligo-éléments.

Dans l'eau, la bentonite gonfle de 10 à 15 fois de son volume original et absorbe 6,5 fois son poids en eau, pour cette qualité, elle est un excellent produit de forage, très efficace pour la tenue des parois et la remontée des sédiments.

Les sépiolites et les palygorskites ou argiles magnésiennes sont des argiles constituées non pas de feuillets mais de tubes empilés, cela leur permet d'adsorber des gaz. La sépiolite est utilisée comme litière à chat par exemple. Les interstratifiées sont des argiles constituées d'autres argiles plus ou moins régulièrement empilées : ainsi la smectite et une illite peuvent s'associer pour former une interstratifiée. Exemple : la montmorillonite du Vaucluse est une interstratifiée de séricite et chlorite, etc.

Il existe beaucoup d'autres familles au comportement varié, mais elles sont rarement pures dans le commerce. Sauf peut-être les vermiculites utilisées en cultures légumières et en isolation. Dans le commerce, les argiles sont constituées le plus souvent de mélanges. Les

argiles vertes sont en fait des mélanges complexes dont la couleur peut être due soit à du fer ferreux finement divisé, soit à des hydroxydes magnésiens (brucite).

Autres noms des argiles : terre à foulons, terre de Sommières, terre à porcelaine, argiles réfractaires, terre de pipe, terre glaise (argile impure riche en oxydes de fer et en limons) [15].

La structure des argiles se présente sous forme de feuillets alternés et des compositions de couches différentes selon le type d'argile qu'on a : Kaolinite, smectite, illite... (figure 7) [16].

Les micrographies obtenues par microscopies électroniques à balayage et à transmission [17, 18] montrent une morphologie de plaquettes hexagonales de particules de la kaolinite (figure 8).

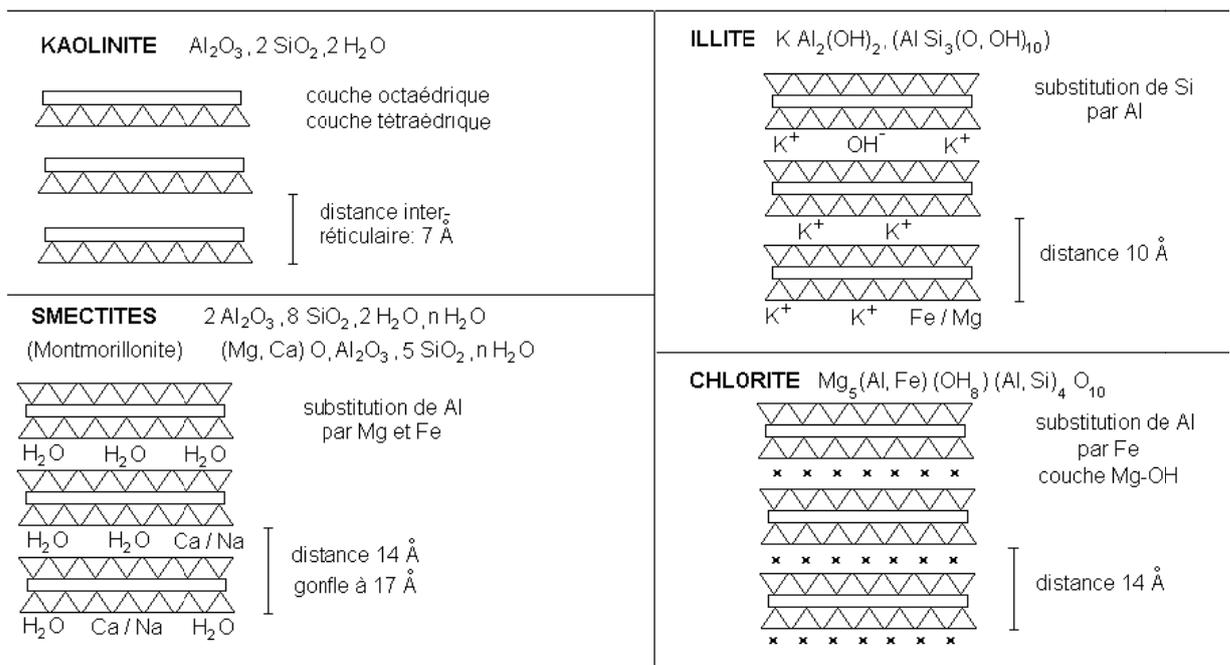


Figure 7 : Structure des feuillets d'argile [16].

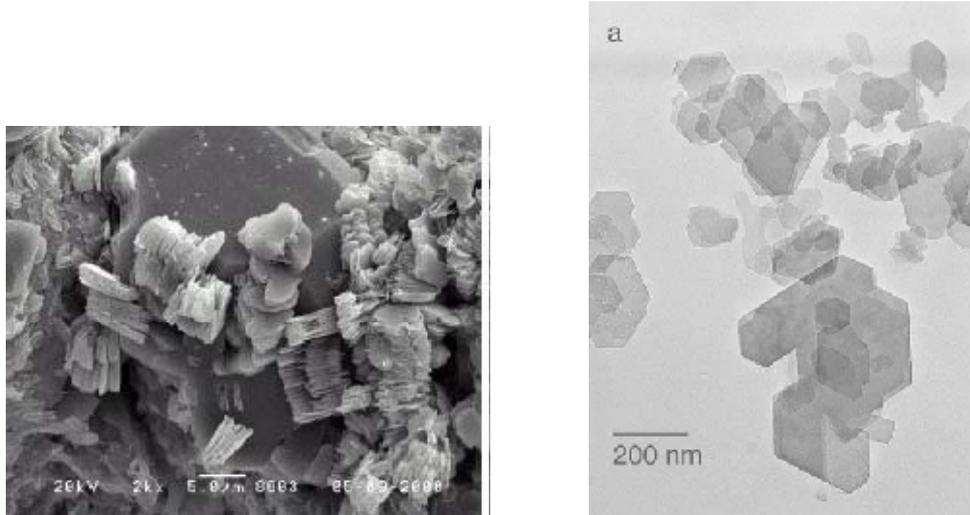


Figure 8 : Micrographies de la kaolinite [17, 18].

III.2. Distinction entre les roches et minéraux

Les roches sont constituées de minéraux. Le rapport hiérarchique entre minéraux et roches est comparable à celui qui existe entre les briques et le mur qu'elles constituent. Les roches peuvent être monominérales ou polyminérales suivant qu'elles sont constituées d'une seule ou de plusieurs espèces minérales. Le marbre est une roche monominérale, formée uniquement de cristaux de calcite. Le granite (figure 9), est une roche polyminérale faite d'un assemblage de cristaux de feldspath, de quartz et de mica [1].



Figure 9 : Granite [1].

IV. LE CYCLE DES ROCHES

La cristallisation du magma donne des **roches magmatiques**.

L'altération, la sédimentation, la diagenèse donnent des **roches sédimentaires**.

La température et la pression donnent des **roches métamorphiques** [16].

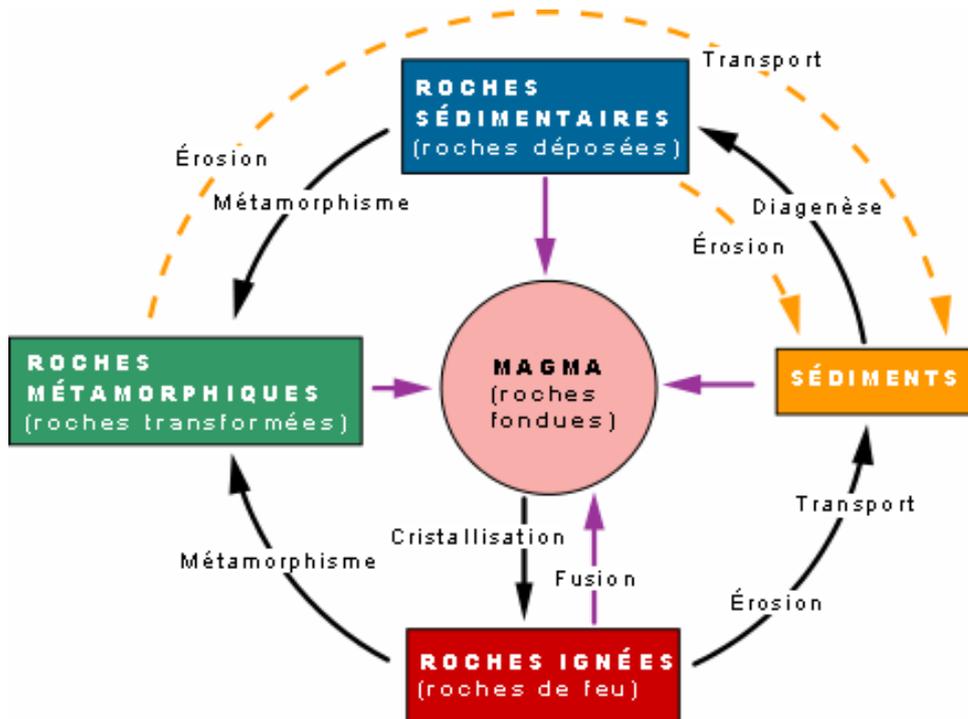


Figure 10 : Le magma à l'origine de la grotte [16].

V. QUELQUES EXEMPLES DES MINÉRAUX ET ROCHES

V.1. La calcite

C'est le carbonate de calcium (Ca CO_3) cristallisé (rhomboèdre à six faces), minéral des roches sédimentaires, principal constituant des roches calcaires et métamorphiques en dérivant. Incolore à transparent. Minéral le plus répandu sur terre après le quartz [19].



Figure 11 : Les différentes formes de Calcite [19].



BLANCHE

BLEUE

Figure 12 : Couleur de Calcite [19].

V.2. Les roches carbonées

Ce sont des roches sédimentaires contenant du carbone en proportion variée. On distingue la houille, la lignite, la tourbe, les hydrocarbures, ainsi que le graphite. Coquillier

(calcaire) : calcaire renfermant des coquilles fossiles (cérithes, gryphées, entroques, cératites, lumachelles, faluns) (figure 13) [19].



Figure 13 : Fossile dans une roche sédimentaire [19].

V.3. Les grès

Ce sont des roches détritiques, poreuses, souvent litées, constituées de sable lié par un ciment siliceux ou calcaire. Variétés : grès pur à ciment siliceux, grès ferrugineux à ciment siliceux, grès quartzeux, grès à ciment calcaire (ciment formé de calcite) (figure 14) [19].



Figure 14 : Roche Gréseuse [19].

V.4. Le gypse

C'est un sulfate de calcium hydraté (CaSO_4), minéral des roches sédimentaires, à structure cristalline monoclinique. Variétés : gypse "fer de lance" ou "pied d'alouette", gypse saccharoïde (à grains fins), gypse fibreux (fines aiguilles accolées), gypse "rose des sables", albâtre (gypse blanc pur) donnent du plâtre (sulfate de chaux) par cuisson.

Le plâtre, additionné de gélatine et de colorants donne le stuc (marbre artificiel).

L'anhydrite est du gypse ne contenant pas d'eau (figure 15)[19].



Figure 15 : Roche gypse [19].

V.5. Kaolin

C'est une roche argileuse, constituée de kaolinite, silicate d'aluminium hydraté (2SiO_2 , Al_2O_3 , $2\text{H}_2\text{O}$). Il résulte de l'altération de roches feldspathiques potassiques (granites, Pegmatites) de couleur blanche, friable, imperméable, réfractaire (figure 16) [19].



Figure 16 : Roche Kaolin, [19].

V.6. La marne

C'est une roche à la fois argileuse et calcaire. On distingue les marnes argileuses (de 5% à 35% de carbonate de calcium), les marnes (35% à 65%), les calcaires marneux (65% à 95%). Couleur variable, aspect terreux, avide d'eau. Chauffées, elles donnent respectivement la chaux (marne argileuse), la chaux hydraulique (marne), le ciment (marne calcaire) (figure 17) [19].



Figure 17 : Roche marne [19].

V.7. Le sable

C'est une roche meuble, constituée de grains de quartz, d'une dimension de 0,1 à 2 mm. Au-dessus de 2 mm, gravier et galets. D'autant plus pur en silice qu'il est clair. Provient de la destruction de roches riches en quartz (granites, gneiss).

Variétés : sables micacés, feldspathiques, glauconieux (de couleur verte), ferrugineux (de couleur jaune à brun), calcaires. Fondu et mélangé à des carbonates de sodium et de calcium, donne du verre, qui peut être coloré par des oxydes métalliques (l'ajout de plomb conduit au cristal) (figure 18)[19].



Figure 18 : Sable [19].

V.8. Le marbre

C'est des roches métamorphiques dérivant, par écrasement et élévation de température, de roches calcaires. Ils sont composés de calcite et sont de couleur blanche à l'état pur, mais ils renferment souvent diverses impuretés qui forment des veines.

Variétés : marbre blanc, marbre rouge, marbre noir, marbre vert, cipolin (figure 19) [19].



Figure 19 : Marbre [19].

VI. PROPRIETES DES GEOMATERIAUX

Toute valeur permettant de déterminer une caractéristique donnée est appelée propriété. La connaissance des propriétés des matériaux permet de prévoir leur capacité à résister sous des conditions diverses [20].

VI.1. Dureté

La dureté d'un minéral correspond à sa résistance à se laisser rayer. Elle est variable d'un minéral à l'autre. Certains minéraux sont très durs, comme le diamant, d'autres plutôt tendres, comme le talc.

Les minéralogistes ont une échelle relative de dureté qui utilise dix minéraux communs, classés du plus tendre au plus dur, de 1 à 10. Cette échelle a été construite par le minéralogiste autrichien Friedrich Mohs et se nomme par conséquent l'échelle de Mohs [21].

Indice de qualité	Dureté	Minerai
1	Rayable facilement à l'ongle	Talc, craie
2	Rayable à l'ongle	Gypse, sel gemme
3	Rayable facilement avec une pointe en acier	Calcite, anhydrite
4	Rayable avec 1 point d'acier avec un faible effort	Fluorine
5	Rayable avec un point d'acier avec un grand effort	Apatite
6,7	Raye facilement le verre	Feldspath, quartz
8,9	Raye facilement le verre	Topaze, corindon
10	Raye facilement le verre	Diamant

Tableau 3 : Dureté de minéraux selon l'échelle de Mohs [20, 21].

VI.2. Homogénéité

Le matériau est dit homogène, si on découperait ce dernier en morceaux très petits, on devrait retrouver les mêmes constituants [20].

VI.3. Isotropie

Si on prend un point défini dans un matériau, pour qu'il soit isotrope, il faut qu'autour du point et dans toutes les directions, on ait les mêmes propriétés [20].

VI.4. Forme cristalline

La forme cristalline est souvent ce qui donne la valeur esthétique d'un minéral. Chaque minéral cristallise dans un système donné ce qu'on appelle un système cristallin. Un minéral donné reproduira toujours les mêmes formes régies par ce système. Par exemple, la halite cristallise dans le système cubique. La calcite cristallise dans le système rhomboédrique, un

système où les trois axes sont de longueur égale et où les angles entre les axes sont identiques, mais différents de 90°. Le quartz commun cristallise dans le système hexagonal. On aura des cristaux à six côtés, et, dans les formes pyramidales, on aura une pyramide à six faces à chaque extrémité [22].

VI.5. Masse volumique

La masse volumique est dite apparente si le volume du quotient est le volume total de matériau. En revanche, la masse volumique est absolue si le volume du quotient est le volume des grains solides [20].

$M_{vapp} = M/VT$; $MV_{abs} = M/Vs$, $[Mv] = g/cm^3$

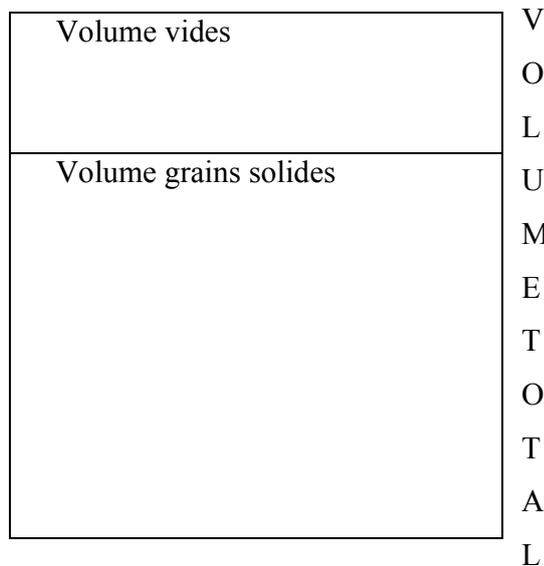


Figure 20. Volume totale des roches [20].

VI.6. Porosité

a) Définition

La porosité d’une roche ou de tout autre corps poreux, est définie comme le rapport entre le volume des vides et le volume total du corps considéré, exprimée en pourcentage

[18]. Chaque roche est caractérisée par sa porosité, c'est -à-dire par la taille des interstices (appelés pores) entre les éléments solides de la roche [23].

$$N = V_v / V_t$$

Avec :

Nt : porosité totale

Vv : volume vide

Vt : volume total

On aura :

$$N_{tot} = (M_{sat} - M_{sec}) / (M_{sat} - M_{hyd})$$

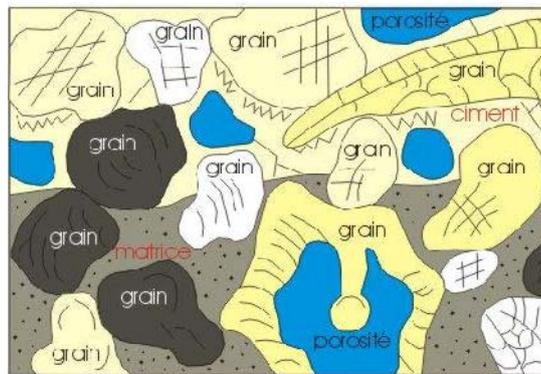


Figure 21 : Structure d'une roche carbonatée [24].

Géomatériaux ou M.D.C	Porosité %
Calcaire	0,8–2,7
Craie	3,0–53
Granit	0,5–2,8
Sable	0–5

Tableau 4 : Différentes valeurs de porosité des roches [20].

b) Exemple pour observation des Pores

Suivant un modèle proposé par Bernabé (1991) et imagé par Fredrich, *et al.* (1993) sur les grés de Fontainebleau, on peut schématiser la porosité d'un gré exempt de particules

Argileuses, et par extension d'une roche granulaire, par trois types de vides, organisés en un réseau poreux tridimensionnel (figures a et b). Les "**pores**" sont situés à l'intersection de quatre grains et dispersés dans la roche. Ils sont hérités de la genèse de la roche et représentent une grande part du volume poreux au sein des roches de type granulaire, mais ne contribuent à la circulation des fluides que s'ils sont connectés entre eux par l'intermédiaire de pores cylindriques plus aplatis, en forme de "**tubes**" ou de "**fentes**" (ou fissures), situés respectivement entre trois ou deux grains (figure 22) [25].

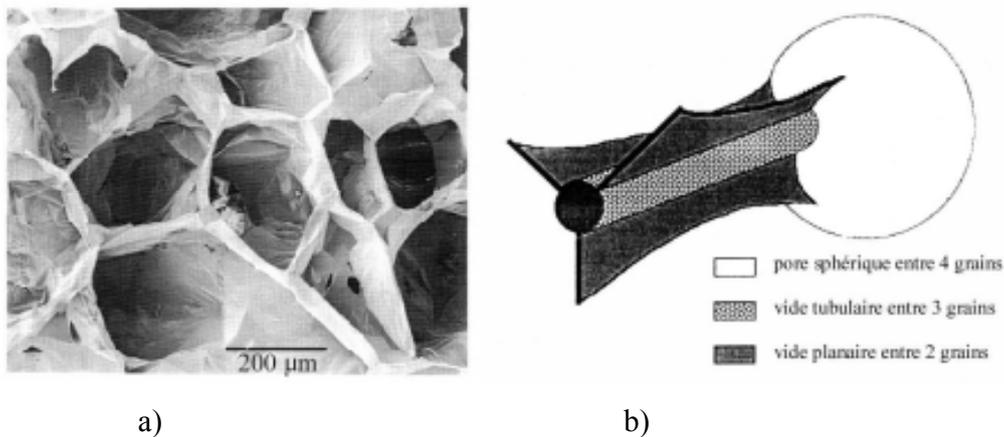


Figure 22 : Porosité dans les grés :

- a) image en microscopie électronique du réseau poreux rempli de résine d'un grés de Fontainebleau de porosité 4% après dissolution des grains à l'acide (Guéguen et al., 1986),
 b) modèle de la porosité dans un grés d'après Bernabé (1991)

VI.7. Propriétés optiques

Les propriétés optiques constituent un élément diagnostique fondamental dans l'identification d'un minéral. Mais la détermination de ces propriétés relève plutôt du spécialiste. En géologie, les moyens techniques permettent d'amincir des tranches de minéraux collées sur des lamelles de verre si minces (30 micromètres) qu'elles deviennent tout à fait transparentes. On peut alors étudier ces minéraux au microscope, comme font les biologistes avec des tissus ou des microorganismes. Chaque groupe de minéraux possède ses propriétés optiques, c'est-à-dire qu'ils transmettent différemment la lumière et qu'ils produisent des couleurs caractéristiques lorsqu'ils sont observés en lumière polarisée, ce qui, en bout de ligne, permet de les identifier [26].

CHAPITRE II
ORIGINE DES MATIERES PREMIERES

CHAPITRE II**ORIGINE DES MATIERES PREMIERES****I. HISTORIQUE DES TRAVAUX DE RECHERCHES GEOLOGIQUES ET MINIERES****I.1. Travaux antérieurs sur la région de Constantine**

Plusieurs études et travaux de recherche ont été effectués dans la région :

- En 1868 (Hardouin), en 1881 (Tissot), en 1889 (Pomel) puis en 1900 (Ficher) ont faits des levés de l'ensemble à petite échelle (levés de Constantine au 1/25000 et cartes de Constantine au 1/50000).
- En 1912, L. Joleaud dans sa monographie accompagnée d'une carte au 1/200000 a réalisé les levés des plusieurs cartes au 1/5000 en donnant une stratigraphie sommaire de la géologie de Constantine.
- En 1948, J. Flandrin a fait l'étude du Tertiaire ancien du Nord Constantinois.
- En 1960-1969, M. DURAND Delga et en collaboration avec d'autre géologues français (J. F. Raoult, J. P. Bouillin...etc.) ont entrepris des études sur l'Est et le nord de Constantine (levés réguliers au 1/50000).
- En 1973, R. Guiraud a fait l'étude du néritique constantinois.
- En 1980, J.M. Vila a étudié sur une plus grande échelle le néritique constantinois dans sa thèse sur la chaîne alpine d'Algérie Nord Orientale et des confins Algéro-Tunisiens.
- En 1987, J.C. Lahondere a étudié les environs de Constantine et a introduit la notion du penitellien.
- En 1992, P. E. Coiffait a établis une étude sur le bassin de Constantine.
- En 1994, les travaux d'Y. Arris ont contribué à l'étude des déformations tectoniques de la région à partir de la micro-tectonique [27].

I.2. Cadre géologique de la région du constantinois

La région du Constantinois (Algérie nord orientale), qui appartient à la chaîne alpine maghrébine d’Afrique du nord (Fig. 23), a connu une histoire géologique extrêmement complexe, elle est formée essentiellement par un empilement de nappes et de chevauchements de grandes envergures.

L’aire étudiée comprend une vaste zone qui va de la région Sud de Constantine (hautes plaines Constantinoises) à Azzaba en passant par le bassin Mila-Constantine et les monts d’El Kentour.

Les structures géologiques considérées, appartiennent par conséquent à plusieurs domaines structuraux et paléogéographiques bien définis [28].

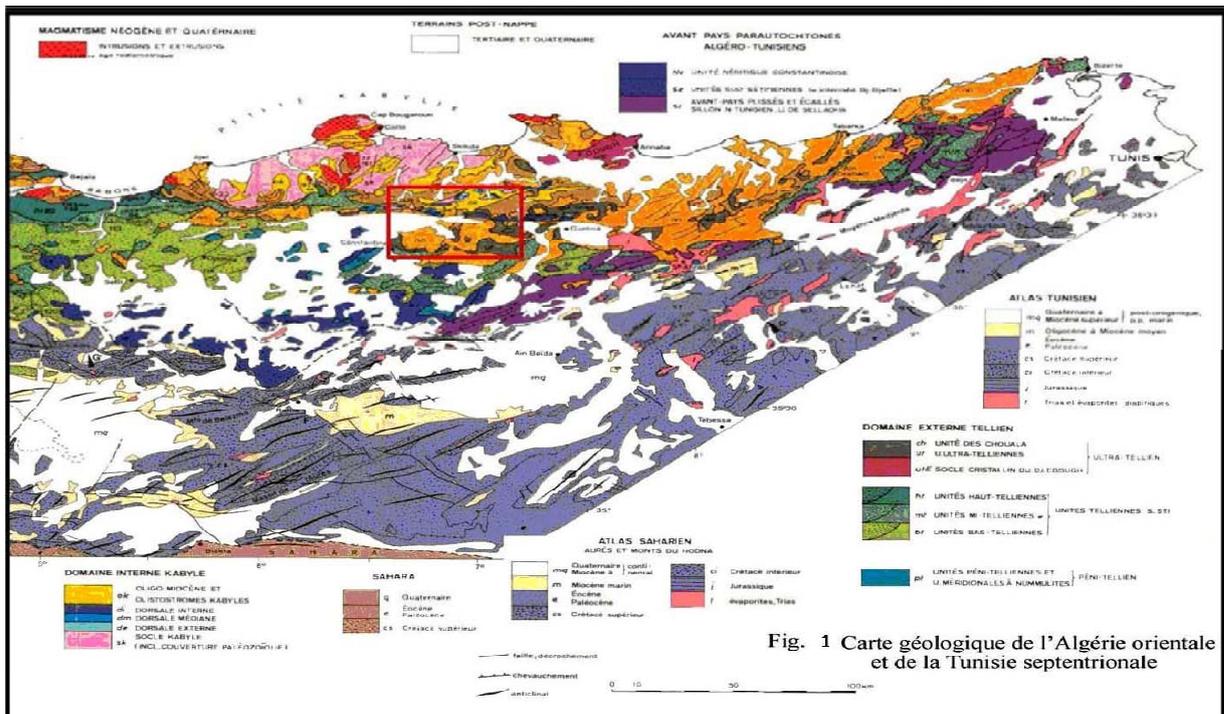


Fig. 1 Carte géologique de l’Algérie orientale et de la Tunisie septentrionale

Figure 23 : Carte géologique de l’Algérie orientale et de la Tunisie septentrionale [28].

II. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE DE DJEBEL EL OUAHCH ET DJEBEL KELLAL**II.1. Présentation de la zone d'étude de djebel el ouahch****II .1.1. La région de Djebel el ouahch (Kef El Akhel)**

Constantine, l'une des grandes Wilayas de l'Est Algérien, limitée au Nord par la W .de Skikda, au Sud par la W. de Oum el-Bouaghi, à l'Est et à l'Ouest respectivement par la wilaya de Mila et Guelma. Elle s'éloigne de 11 à 12 Km de Constantine, elle est limitée au :

- Nord : par la région de Zighoud Youssef.
- Sud : par l'arboretum de Draa Naga, vers el khroub.
- Est : vers El Aria.
- Ouest : par la pépinière de Djebel – Ouahch, vers Constantine.

II .1.2. Topographie et géologie

Le relief varie en escalier, nous remarquons des pentes moyennes à fortes, par contre au sud, une topographie plus calme avec des pentes moyennes plus faibles, le constantinois se caractérise par de grands massifs Karstifiés, émergeant en horst d'un ensemble de terrain à dominance marneuse (Coiffait et al, 1977 ; in Bourass et Frika, 1999).

II.1.3. Géomorphologie

La présence d'une chaîne numidique, composée de grès très friable mélangés avec de l'argile imperméable, ce binôme subit une action érosive différentielle dégageant un paysage de grés, cette dernière donne la roche la plus dure constituant le relief dominant.

II.1.4. Pédologie

Les principaux types de sol rencontrés au niveau de Djebel Ouahch sont:

- Sols minéraux bruts: 9%
- Sols peu évolués : 20%
- Les vertisols: 1%
- Les sols calcimagnésiques: 20%
- Les sols isohumiques: 50%, (C.U.R.E.R, 1977) [29].

II. 2. Présentation de la zone d'étude de djebel Kellal**II.2.1. Les données morphologiques****a) Les formes karstiques**

Le massif de Djebel Kellal recèle une Karstification assez développée le long d'un réseau de failles notamment E-W. Par ailleurs on a pu relever les vestiges d'une circulation d'eau chaudes au niveau de la zone de broyage à l'extrémité Est du Djebel Kellal là où affleure le Trias, ainsi qu'au niveau de la zone de broyage du Djebel Ayata [28].

b) Les colluvions

L'action mécanique et tectonique s'exerçant sur certaines pentes fortes, a conduit au détachement de blocs et à leur chute sur les versants. En fait ces blocs dévalent jusqu'à une pente faible située au pied des abrupts. Ils sont développés surtout en bordure des reliefs numidiens et des massifs calcaires qui se trouvent le long du tracé [28].

II.2.2. Les structures particulières

Les différentes analyses réalisées à partir de la cartographie géologique de surface ont permis de relever trois structures particulières par leurs formes et leurs relations avec les structures géologiques adjacentes :

a) La grotte de Djebel Kellal

Au niveau de Djebel Kellal on y observe le développement de plusieurs grottes.

La nature carbonatée du massif et le dense réseau de fracturation favorise l'évolution de ces formes karstiques, notamment sur le versant Sud où on a observé une grotte qui dépasse les quarante mètres de longueur (profondeur), le long d'une faille E-W [28].

b) Le Chaos d'El Kantour

A l'aplomb du portail Nord du tunnel d'El Kantour au dessus des calcaires liasiques, le long d'un grand escarpement de ligne de faille E-W, (appartenant au couloir E-W), nous observons un entassement sans ordonnance de blocs calcaires pluri métriques que nous avons appelé structure en Chaos [28].

III. LOCALISATION DES MATIERES PREMIERES

Dans ce qui suit, nous nous intéressons essentiellement aux échantillons des matériaux locaux tels que le calcaire blanc, le calcaire gris et l'argile sous forme de roches collectées sur site.

Les matières premières utilisées dans notre travail sont le calcaire blanc, le calcaire gris et l'argile. Le Calcaire blanc et le calcaire gris choisi est issu de la région de Constantine, du mont de djebel kellal (figure 24). L'argile utilisée a été extraite du Tunnel de djebel el ouahch (Figure 25).

Sur le flanc sud ouest de djebel kellal se trouve une station de concassage et broyage des calcaires, c'est la station de kaf salah (figure 26).

Il existe différents types de calcaire dans cette région qui dépend intimement de la nature des impuretés et de leurs concentrations. Nous utiliserons dans nos travaux le calcaire blanc et calcaire gris (Figures 27 et 28).



Figure 24 : Djebel kellal.



Figure 25 : Tunnel de djebel el ouahch.



Figure 26 : Station de concassage de Kaf Salah.



Figure 27 : Lieu d'extraction des calcaires blancs de djebel kellal.



Figure 28 : Lieu d'extraction des calcaires gris de djebel kellal.

L'extraction de nos échantillons sur site s'est faite par le système GPS, leurs positions figurent dans le tableau suivant :

	Z	X	Y
Ech 01 Calcaire blanc	830	288973	4033285
Ech 02 Calcaire gris	846	288960	4033246
Argilite Numidienne	32 S 0290746 (Nord)		4030924 (Est)

CHAPITRE III
DOMAINES D'APPLICATIONS DES
CALCAIRES ET DES ARGILES

CHAPITRE III

DOMAINES D'APPLICATIONS DES CALCAIRES ET DES ARGILES

I. INTRODUCTION

Les matériaux de construction trouvent leur origine dans le sol, en premier lieu les pierres qui sont depuis les temps les plus anciens des éléments de construction résultent du refroidissement progressif de la masse de la terre passant dans sa première phase de formation de l'état gazeux à l'état liquide (le magma) puis, au contact de l'atmosphère, à l'état solide (l'écorce terrestre). D'autres pierres naturelles résultent de celles-ci par désagrégation, sédimentation et altération. Les pierres naturelles possèdent des formes et dimensions très variées.

Depuis toujours, l'Homme utilise les matériaux naturels du sous-sol, les roches, pour ses industries et ses constructions. Les premiers outils préhistoriques, galets aménagés, datent d'environ deux millions d'années. Depuis, l'humanité n'a cessé d'extraire les diverses matières minérales dont elle a besoin pour vivre et se développer [30].

II. HISTOIRE DE L'UTILISATION DES ROCHES

Les roches dures telles que le granite, le calcaire, le grès ou certaines roches volcaniques, furent débitées et utilisées comme pierres de construction. On fabriquait des meules avec de la meulière ou du grès. L'industrie de la terre cuite se développa il y a des milliers d'années. Elle permit de réaliser des poteries, des briques et des tuiles. De façon empirique, sans doute, on découvrit qu'en chauffant du gypse on obtenait du plâtre, que la cuisson du calcaire donnait la chaux et que le sable fondait pour donner le verre. La découverte du verre daterait d'environ 1 500 ans avant notre ère. Quant au plâtre, il fut, par exemple, utilisé dans l'ancienne Égypte, à l'époque des pharaons, pour sceller des pierres de construction et réaliser des enduits, en particulier dans la vallée des rois, près de Louksor.

Pendant l'époque historique, les sociétés s'organisèrent progressivement avec un développement de l'habitat urbain, des monuments, des systèmes de défense et des voies de communication. Dans la mesure où cela était possible, on utilisait directement les pierres du

sous-sol local pour réaliser les ouvrages. Dans les pays qui ne possèdent pas de roches dures dans leur sous-sol, mais des argiles, on construisait briques, comme dans le nord de la France par exemple. Paris et sa région sont à ce titre un bon exemple des rapports d'une ville aux matériaux de son sous-sol. Après avoir exploité la pierre de taille sous la ville et dans ses proches faubourgs, on ferma les carrières pour en ouvrir d'autres, dans les mêmes couches géologiques, à la périphérie. La richesse du sous-sol en pierre à plâtre fit qu'il fut utilisé comme enduit dès le Moyen-âge, ce qui, à la différence de la plupart des autres grandes villes de cette époque, sauva la ville des grands incendies. On exploita aussi la meulière, ainsi que les grès et le sable de Fontainebleau pour l'industrie du verre [30].

III. LES ARGILES ET LA ROCHE CALCAIRE - MATERIAUX ET APPLICATIONS :

III.1. Les argiles et leurs domaines d'utilisations

Ils constituent un groupe complexe de minéraux de provenance, de minéralogie, de caractéristiques et d'usages différents. Ce sont tous des minéraux naturels d'apparence terreuse, de granulométrie fine qui sont composés surtout de silicates hydratés d'aluminium, aux quels s'ajoutent du fer, des alcalis et des éléments alcalino-terreux.

Les minéraux argileux sont classés dans deux grands groupes, celui des argiles spéciales, qui comprend notamment l'attapulgite, la bentonite, l'argile à foulon, ainsi que celui des argiles kaolinitiques. Ces minéraux sont rarement purs et reposent avec des minéraux, dans une gangue (le quartz, la calcite, la dolomite, le feldspath, le gypse et les oxydes de fer).

L'argile est une matière première abondante qui possède une large gamme de propriétés et d'applications. La valeur commerciale d'une argile dépend en premier lieu de ces propriétés physiques et physico-chimiques, mais aussi de la proximité des marchés où les produits d'argile sont utilisés.

Les utilisations des argiles en génie environnemental sont dues principalement à leur propriété d'étanchéité (base perméabilité) et à leur capacité de rétention des contaminants sur leur surface chargée électriquement. Ainsi, les argiles sont utilisées comme barrière d'imperméabilisation au fond et en recouvrement de cellules de sites d'enfouissement sanitaire, au fond de bassins de rétention d'eaux de lixiviation ou de rejets liquides industriels et comme composantes dans des lits filtrants [31].

Les propriétés des argiles ont été reconnues et utilisées depuis la plus haute antiquité par nos ancêtres. L'argile rentre dans plusieurs domaines d'applications industriels, artisanaux, pharmaceutiques et autres :

a- Matériaux de construction

L'argile calcinée est la matière première principale avec quelques additions de sable, de chamotte comme fondant dans la fabrication des briques, tuiles et céramiques, Les argiles peu fusibles sont réfractaires entre 1350 à 1580° C et servent pour la fabrication des briques, des carreaux de sol et les tuyaux d'évacuations.

b- Ciment composé CPJ

L'argile peut être utilisée comme ajout pouzzolanique dans la fabrication des ciments avec additions minérales à un taux de substitution de 30% environ.

c- Utilisation générale

La composition d'une solution saline est modifiée au contact d'argile, des cations "disparaissent" et sont remplacés par d'autres empruntés à l'origine elle-même; c'est le phénomène d'échange de cations. Les argiles, servent aussi à diluer les pesticides utilisés en agriculture lors de leur épandage. Le pesticide, doit atteindre sa cible sans être décomposé par l'argile pendant les étapes suivantes : production, transport, stockage et application. Les argiles du groupe des smectites (montmorillonite) ou encore la sépiolite et la palygorskite sont utilisées dans l'industrie pour leur propriété d'absorption et d'adsorption :

- Absorption des huiles et graisses (sols des garages; d'usines,), dégraissage;
- Décoloration des huiles et usage comme liant pour les aliments du bétail.
- Usages pharmaceutiques (excipients, pansements gastro-intestinaux...).
- Boues de forage en milieu salin, engrais en suspensions.
- Les interstratifiés smectite-kaolinite servent en fonderie comme liant des sables de moulage.

De nombreux travaux ont montré que les argiles possèdent aussi des propriétés catalytiques. On retiendra:

- Les catalyseurs argileux dans le cracking des produits pétroliers.

- Les propriétés catalytiques de la montmorillonite dans la formation des aminoacides et dans leur polymérisation en peptides;
- Les essais de polymérisation du benzène en polyparaphénylène dans une Montmorillonite.
- Les tentatives de polymérisation du styrène du méthacrylate de méthyle et d'autres Composés organiques non saturés sur les surfaces de certains minéraux argileux. De L'étude comparative des activités catalytiques de divers minéraux argileux Sur La polymérisation du styrène, il ressort que la kaolinite, la palygorskite et certains mélanges kaolinite - palygorskite- illite- montmorillonite donnent des résultats satisfaisants.
- Les argiles kaolinitiques non modifiées ont un caractère semi -renforteur des gommes naturelles; ce pouvoir est d'autant plus grand que les argiles utilisées sont pures et bien cristallisées. La teneur en kaolinite est favorable au semi- renforcement tandis que les teneurs en quartz et en mica lui sont défavorables.
- L'industrie papetière a connue depuis une cinquantaine d'années, un développement considérable qui a la place au premier rang des consommateurs de kaolins. En papeterie l'utilisation se répartit entre les kaolins de masse, servant à améliorer les propriétés optiques de la trame cellulosique et les kaolins de couchage qui assurent la qualité et l'aspect esthétique de l'impression. Plus récemment sont apparus les cartons couchés dans la fabrication d'emballages supports publicitaires.
- Les industries céramiques du bâtiment sont utilisatrices d'argiles kaolinitiques; les carreaux de grés céramique pare exemple sont soumis à des conditions d'utilisation particulières, on recherche alors une résistance mécanique élevée et une bonne régularité des produits [32].

d- Applications des pâtes céramiques dans différents domaines :

1- Domaine médical

Le secteur médical utilise les biocéramiques en chirurgie réparatrice et dans le domaine dentaire. Deux générations de céramiques ont été développées ;

La première, inerte chimiquement assurait une innocuité vis-à-vis de l'organisme. On cite comme exemple, les prothèses de hanches qui sont à base d'alumine, et les prothèses dentaires à base de silice et d'alumine. Cette génération a évolué pour faire place à des

matériaux capables d'interagir positivement avec les tissus environnants : ce sont les céramiques de deuxième génération comme les osselets de l'oreille, les prothèses [33].

2- Domaine de l'aéronautique et spatial

Dans ce secteur, les céramiques sont des matériaux à très forte valeur ajoutée, dit thermosturcturaux. Ces composites à matrice céramique ou CMC, sont des matériaux présentant de hautes charges à la rupture, une bonne résistance à la tension, résistants aux agressions à haute température et corrosion, offrant une bonne tenue aux chocs thermiques : Eléments de turbine, chambre de combustion, filtres à gaz, collage (pâte pour joints à hautes températures), etc.. [33].

3- Domaine de l'énergie

Les bonnes propriétés mécaniques des céramiques à des températures supérieures à 1200°C et leur résistance élevée à des environnements chimiques agressifs, des matériaux céramiques sont employés pour la génération et la conversion d'énergie. Parmi ces applications, on cite : les éléments chauffants pour fours à haute température, échangeurs de chaleur, éléments de batterie, etc.. [33].

4- Domaine de la métallurgie

L'élaboration des métaux et des alliages se fait à des températures élevées : entre 600 et 800°C pour l'aluminium et ses alliages, entre 1200 et 1700°C pour les fontes et les aciers ordinaires, jusqu'à 2000°C pour les aciers spéciaux. Les matériaux réfractaires utilisés dans le secteur de la métallurgie présentent une bonne résistance mécanique et chimique à haute température; ils sont utilisés, soit sous forme de briques ou pièces diverses, soit sous forme de béton coulé en place. IL s'agit des matériaux de revêtements de haut fourneau, des réfractaires résistants à la corrosion par les métaux et les sels fondus, barrière anti corrosion par les gaz et les liquides à haute température, pièces de formes pour les métaux en phase liquide pour avoir une forme définitive, etc [33].

III.2. Le calcaire et ses principales utilisations

Le calcaire est une pierre d'origine naturelle comportant des niveaux élevés de carbonates de calcium et ou magnésium. Le terme « chaux » désigne le produit dérivé du calcaire, notamment la chaux vive, la chaux éteinte et la chaux hydraulique. Utilisation de produit à base

de chaux et de calcaire remonte à la préhistoire. Utilisés depuis plus de 12000 ans, il s'agit des plus anciens matériaux utilisés par l'humanité dans toutes sorte d'applications : en art et en architecture, dans les matériaux de construction, la préparation des aliments, les soins de toilette personnels, les produits chimiques industriels et bien plus. Ces produits sont très utilisés et représentent une composante de base importante dans notre société industrielle, mais aussi dans l'assainissement / conditionnement des eaux et des sols. En particulier des produits fait à la base de la roche calcaire ont été utilisés comme adoucisseurs d'eau, pour l'ajustement de PH, pour la précipitation des métaux lourds et des sels (phosphates et chlorures).

Les produits dérivés du calcaire (CaCO_3) possèdent la capacité unique d'être transformés et de reprendre leur forme originale. Le calcaire est la roche sédimentaire la plus importante et la plus abondante ; elle se forme par le tassement des restes de coraux, d'animaux et de plantes au fond des océans à travers le monde. Le calcaire est composé d'un minéral, la calcite (carbonate de calcium) et ou la dolomite (carbonate de calcium et de magnésium) ainsi que de petites quantités d'autres minéraux. On compte trois types distincts de calcaires, qui sont définis en fonction de leur concentration en carbonate de magnésium (MgCO_3) :

1. le calcaire dolomitique comporte de 35% à 46 % de carbonate de magnésium.
2. Le calcaire magnésien, contient moins de 5% de carbonate de magnésium [32].

Lorsqu'on parle de l'utilisation de calcaire nous pouvons distinguer selon la composition chimique, le carbonate de calcium CaCO_3 (calcaire), la chaux CaO , chaux hydratée ou chaux éteinte $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Les calcaires sont utilisés sous des formes granulométriques diverses, les agrégats, broyés, moulus ou micronisés. Le calcaire sous ces différentes formes couvre des utilisations très variées, comme par exemple dans les domaines suivants :

- La construction (routes, bâtiment)
- La métallurgie et verrerie (hauts fourneaux, fonderie, verre, fibre de verre)
- Les charges (papeterie, peinture, colles, caoutchouc)
- L'agro-alimentaire (l'alimentation animale et humaine, engrais, sucreries, industrie pharmaceutique).
- L'industrie chimique (production de la soude, pétrochimie, tanneries)
- L'environnement (traitement des eaux, traitement des boues, traitement des fumées, traitement des déchets ménagers).

Par exemple un mètre cube d'eau potable demande l'utilisation de 50 à 200 grammes de chaux afin de réaliser la précipitation des métaux lourds et la floculation des boues [34].

Les roches calcaires sont utilisées aussi :

- Comme matériau en sculpture (technique de la taille directe).
- Comme matériau d'empierrement de la voirie : macadam, graves calcaires, ballast, d'un usage très fréquent.
- Comme sable et granulats dans la fabrication des bétons, plus rarement dans les enrobés bitumineux, pour les calcaires les plus durs.
- Comme charge minérale pulvérulente dans divers produits industriels (plastiques, colles, récurrents...).
- Comme fondant dans la fusion du verre (en sable) et dans la fusion des métaux ferreux (en castines).
- Comme amendement calcique agricole pour lutter contre l'acidification du sol.
- Comme apport de calcium, dans l'alimentation des animaux d'élevage.
- Comme matière première entrant dans la fabrication du ciment, [35].

Pour une bonne utilisation aussi bien dans la rénovation que dans la construction de nouveaux bâtiments, nous devons faire la différence entre les différentes familles de chaux et connaître leurs caractéristiques et applications, la cuisson décompose le carbonate de calcium " CaCO_3 " (constituant principal du calcaire), pour libérer le gaz carbonique " CO_2 " et laisser la chaux vive " CaO ".



La chaux vive " CaO ", ne peut être utilisée directement, car son hydratation s'accompagne d'un gonflement important inadmissible dans un ouvrage.

Il faut donc hydrater, de façon à obtenir la chaux éteinte, " Ca(OH)_2 ", qui est en apparence une poudre blanche, légèrement soluble dans l'eau, et qui présente les propriétés d'un liant. La chaux est obtenue à partir d'un calcaire très pur qui, porté à une température de plus 1000 degrés, et suite à une réaction chimique, se décompose en chaux vive et en gaz carbonique, (figure 29), [36].

a- La Chaux Vive

Après cuisson, la chaux vive garde le même aspect physique, mais sa masse volumique apparente devient plus faible.

La chaux vive ainsi obtenue a de nombreuses applications: En agriculture, dans la réalisation de routes, dans l'industrie...etc. Elle est employée en l'état, granulée ou broyée. Elle est avide d'humidité et réagit au contact de l'eau avec un fort dégagement de chaleur, puis se transforme en une poudre blanche appelée chaux éteinte [37].

b- La chaux éteinte

Elle est employée dans de nombreux domaines tels que le bâtiment, l'industrie, la dépollution, lorsqu'elle se combine avec le gaz carbonique, elle redevient calcaire [37].

Le tableau 6 regroupe un nombre important de propriétés physico-chimiques de la chaux vive et éteinte et la différence entre les deux états, cité toujours par la référence [37].

Le cycle de la fabrication de la chaux vive et éteinte à partir de roches calcaire, montre bien le processus (figure 30) [37].

c- Les chaux aériennes

On obtient les chaux aériennes en calcinant des pierres calcaires (ou dolomites pures) qui ne contiennent pas plus de 5% de matières argileuses.

Ce type de chaux, lorsqu'elles sont très pures en carbonates (plus de 95%), et à cause de l'onctuosité qu'elles donnent aux pâtes fabriquées en les mélangeant avec de l'eau, ont aussi été appelé, dans le passé, des chaux grasses.

Quand la pureté en carbonates est inférieure et que le pourcentage d'argile atteint 5%, ces chaux aériennes sont appelées chaux maigres parce que la pâte obtenue est moins onctueuse.

Les pâtes sont donc des mélanges de sable (ou de poudre de marbre) et de chaux en pâte dont le dosage varie (ce qui donne des pâtes maigres ou grasses).

Les chaux aériennes se présentent donc sous deux formes : vives (oxyde de calcium CaO) et hydratées (Hydroxyde de calcium Ca (OH) 2) [38, 39].



Figure 29 : Fabrication de la chaux [37].

	La chaux vive	La chaux éteinte
Nom	Oxyde de calcium	Hydroxyde de calcium
Formule chimique	CaO	Ca(OH) 2
Aspect	Roche, granulé, poudre. Blanc	Poudre. blanche
Odeur	Sans	Sans
Point de fusion	2614°C	Décomposition à 580° (Se transforme en CaO)
Point de d'ébullition	2850°C	2850°C
Inflammabilité	Non	Non
Poids spécifique	3350 kg/m3 (à 20°C)	2200 kg /m3 (à 20°C)
Solubilité dans l'eau	1,4 kg/m3 à 0°C ; 1,25 kg/m3 à 20°C	1,85kg/m3à0°C ; 1,65kg/m3 à 20°C
PH	12,4 en solution saturée	12,4 en solution saturée
Réactivité	Réaction avec l'eau et les acides, avec fort dégagement de la chaleur.	Réaction avec l'aluminium en présence d'eau, forte réaction exothermique en présence d'acides.

Tableau 6 : Propriétés physiques et chimiques « chaux vive » et « chaux éteint » [37].



Figure 30 : Le cycle de la chaux [37].

d- Les chaux hydrauliques

Quand la pierre calcinée contient des mélanges de marne et d'argile riches en silice, en alumine et en fer, on obtient des chaux dite hydrauliques, parce qu'elles durcissent aussi bien au contact de l'air que de l'eau. Une chaux est dite faiblement hydraulique (taux d'argile inférieur à 8%), moyennement hydrauliques (taux d'argile de 8% à 14%), hydrauliques (taux d'argile de 14% à 19%) et éminemment hydrauliques (à partir de 20% d'argile). Les résistances mécaniques de toute ces chaux sont plus rapides et plus élevées que celle des chaux aériennes.

Il ne faut pas confondre les chaux hydrauliques avec la chaux hydraté (hydroxyde de calcium ou chaux éteinte). Cette dernière, comme nous l'avons déjà décrit, résulte de l'hydratation, ou l'extinction, de chaux vives avec de l'eau [38, 39].

e- Préparation d'un mortier de chaux

Pour obtenir un mortier de chaux de bonne qualité, il faut suivre la méthode de préparation suivante, qui va durer 8 jours, étape par étape :

Premier jour : On submerge les pierres de chaux issues de calcination, dans un récipient préalablement rempli d'eau, la chaux vive sera éteinte après une réaction exothermique, on laisse reposer le mélange pour s'assurer de l'extinction total de la chaux.

Deuxième jour : il faut ajouter au mélange une quantité d'eau suffisant pour avoir un lait de chaux de bonne qualité, puis on procède au tamisage du contenu pour enlever les déchets. La confection d'un bon mortier de chaux se fait en choisissant du sable de bonne qualité et en ajoutant une quantité suffisante de lait de chaux pour obtenir à une pâte homogène.

Du 3ème au 7ème jour : On laisse reposer le mélange.

7ème jour : On prépare une quantité de chaux éteinte de la même manière que dans le premier jour.

8ème jour : Nous ajoutons au mélange déjà préparé (3ème au 7ème jours) le lait de chaux et on mélangeant suffisamment la pâte nous obtenons un mortier de chaux prêt à être utiliser dans les différents travaux (figure 31) [37].



Figure 31 : Préparation du mortier de chaux [37].

CHAPITRE IV

ELABORATION ET PREPARATION

DES ECHANTILLONS PRELEVES ET

METHODES EXPERIMENTALES

CHAPITRE IV :

***ELABORATION ET PREPARATION DES ECHANTILLONS PRELEVES ET
METHODES EXPERIMENTALES***

I. INTRODUCTION

Le travail de recherche qu'on va présenter est le résultat d'une série d'expériences effectuées dans plusieurs laboratoires de recherche : essentiellement notre laboratoire de transformations de phases (L.T.Ph) et le laboratoire de géologie et environnement (L.G.E) ; et dont l'objectif est de réaliser une étude de caractérisation sur des roches sédimentaires qui sont les calcaires blancs, les calcaires gris et les argiles.

II. MATIERES PREMIERES LOCALE

Dans cette étude, les matières premières qu'on a utilisé ont été extraites d'une part de djebel Kellal pour les roches des calcaires blancs et gris et d'autre part du tunnel de djebel el ouahch pour les argiles ; les deux sites sont situés sur les hauteurs du Constantinois.

II.1. Le calcaire de djebel kellal

Le calcaire est un roche sédimentaire constitué essentiellement de calcite, matière première indispensable et sans substitut pour de nombreuses industries, connu et exploité depuis presque un siècle. Le calcaire utilisé dans l'élaboration de nos échantillons est local, il est extrait de djebel kellal de Constantine (Algérie) et il se trouve sous deux formes : calcaire blanc (Figure 32) et calcaire gris (Figure 33), l'aspect de la différence de coloration est due certainement à leur différence dans la composition chimique, des oxydes probablement présents ainsi que les teneurs des différentes impuretés présentes.



Figure 32 : Matière première calcaire blanc.



Figure 33 : Matière première calcaire gris.

II.2. L'argile du tunnel de djebel el ouahch

L'argile est une roche sédimentaire très friable. Elle a été extraite de l'intérieur du tunnel de djebel el ouahch durant les travaux de forage du tunnel où sur le long de celui-ci plusieurs sortes de roches sédimentaires ont été rencontrées dont cette argile qui fait l'objet de notre étude, (Figure 34).



Figure 34 : L'argile, matière première.

III. METHODES D'ELABORATION DES ECHANTILLONS

III.1. Préparation des échantillons

Les échantillons sont préparés selon les différentes techniques de l'élaboration des roches et selon l'usage qui sera ensuite celui du matériau, après l'extraction qui a eu lieu en mars 2010 pour les calcaires et en avril 2010 pour les argiles.

III.1.1. Concassage

Les étapes d'élaboration sont :

- a. Séchage des roches à l'air libre pendant 72 Heures pour l'élimination de l'humidité dans les roches.
- b. Procéder à un pré-concassage à l'aide d'un marteau spéciale pour applications géologiques.
- c. Opération concassage qui consiste à concasser des kilos de roches à des fins Minéralogiques.

CHAPITRE IV : ELABORATION ET PREPARATION DES ECHANTILLONS PRELEVES ET METHODES EXPERIMENTALES#

Pour cela on a utilisé un concasseur en acier de marque Sait-Montory ; model : T.O (MPI. 31360) (fig. 35), pour une quantité importante de roches et obtenir une poudre de granulats inférieurs à 5 μ m.



Figure 35 : Vue générale d'un Concasseur de type Concasseur Sait-Montory ; model T.O (MPI.31360).

III.1.2. Broyage

Le broyage a comme but de réduire des morceaux de roches inférieurs à 5mm en une poudre moyennement fine ou très fine, pour cela le broyage se fait sur un temps suffisamment long. Une poudre moyennement fine est requise dans certains cas pour la séparation minéralogique et qui aura également une bonne aptitude au compactage selon le précédé de mise en forme utilisé.

Nous avons utilisé un broyeur à anneaux : **Controlab KHD** (HumboldtWedag AG type MN 954/2), (figure 36), la durée dépend de la dureté de l'échantillon.

Ce travail a été effectué au laboratoire de géologie et environnement de l'université Mentouri-Constantine dans le cadre d'un travail de collaboration.



Garniture WC

Couvercle

Figure 36 : Vue générale du broyeur de type **Contralab KHD**
(HumboldtWedag AG Type MN 954/2).

Pour avoir un bon broyage, il est indispensable de suivre les étapes suivantes :

- Programmer le temps de broyage à l'aide de la minuterie. Les temps typiques sont de 30 à 40 secondes pour des roches molles, 50 à 60 secondes pour des roches dures et éventuellement plusieurs minutes pour des sédiments (non consolidés) dominés par des Argiles.

- Si l'échantillon doit être broyé en plusieurs fois, mettre la charge de 60 g suivante dans la garniture et reprendre le broyage. Procéder ainsi jusqu'à ce que l'échantillon soit totalement broyé.

- Nettoyer toutes les pièces à l'eau de robinet à l'aide de la brosse (chiffon éponge). Essuyer avec du papier ménage et utiliser le pistolet à air comprimé pour accélérer le séchage de la garniture.

III.1.3. Tamisage

Après le stade du broyage, les composés subissent un tamisage de 250 μm , 125 μm , 80 μm à l'aide de tamis en inox de 20 cm de diamètre, pour séparer les gros grains qui seront renvoyés au mortier manuel en agate et repris par les tamis, puis avec l'arrivée d'un broyeur à mortier électrique au laboratoire LTPH de Type RM 100 et de marque RETSCH (figure 37), fonctionnant en mode : broyage, mélange et trituration et possédant une commande de minuterie.



Figure 37 : Broyeur à mortier de Type RM 100 et de marque RETSCH.

La réception au laboratoire d'un Tamiseur électrique de marque WQS (vibrating screen) fonctionnant en mode vibratoire, intermittent ou continu (3000 à 6000 oscillations/min), nous a facilité le processus du tamisage jusqu'à obtention d'une poudre de granulométrie inférieure à 80 μm , (figure 38).



Figure 38 : Tamiseur électrique de marque WQS (vibrating screen).

Le mélange et l'homogénéisation de chaque espèce de poudre (calcaire blanc, calcaire gris et l'argile) pendant un temps suffisant est nécessaire pour l'obtention d'un mélange homogène.

En résumé, les échantillons subissent l'ensemble du processus d'élaboration suivant :



Figure 39 : Schéma général des différentes étapes pour la préparation des échantillons étudiés.

III.2. Déroulement de la préparation d'une lame mince

III.2.1. Scie des roches

Dans un premier temps, on définit quelle partie de roche sera travaillée. Puis l'on découpe le morceau souhaité à l'aide d'une scie à eau munie d'une lame spéciale. Cette première étape permet de dégrossir la roche récoltée, tout en conservant un morceau relativement épais. Dans un deuxième temps on le réduit jusqu'à ce qu'il atteigne une grandeur standard.

Nous avons utilisé scie (tronçonneuse) modèle **R. Riédoz Besançon** (Figure 40) au sein du laboratoire de géologie et environnement, Université de Constantine.



Figure 40 : Scie servant à découper les lames model **R. Riédoz Besançon**.

La deuxième manipulation est réalisée à l'aide d'une seconde tronçonneuse permettant un travail plus précis pour découper les sucres qui ont une dimension de 3x4 cm. Après cette étape, nos échantillons deviennent rectilignes et bon pour l'étape du collage.

Nous avons utilisé pour cela, une tronçonneuse model **controls** (Laboratoire de Génie géologique, Université de Jijel), (Figure 41).



Figure 41 : Scie de découpe les sucres de type **controls**.

L'échantillon sera ensuite confié à un spécialiste qui se chargera de l'exécution des lames minces qui demandent un certain temps pour leur réalisation afin de mieux comprendre la nature de ces roches.

III.2.2. Elaboration et préparation des lames minces

La plupart des minéraux en grains qui constituent les roches ne se laissent pas traverser par les rayons lumineux. Pour les observer au microscope, il est nécessaire de réaliser une préparation de très faible épaisseur appelée lame mince. Sa fabrication passe par trois étapes principales : le sciage de la roche, le collage d'un échantillon sur une lame de verre, la réalisation de la lame mince proprement dite par usure de l'échantillon.

Les étapes principales de la préparation des lames minces suivent le cheminement :

- Découpage des sucres à la scie.
- Polissage des sucres sur une polisseuse à l'aide du papier abrasif SiC (400, 800, 1200 μ m), pour avoir une surface polie.

- Polissage des lames sur papier abrasif pour avoir une surface rugueuse, qui facilite le collage des sucres sur les lames.
- Le collage des sucres sur les lames de verre, (figure 42).
- Mise en place les lames porte-objet à la presse de collage pendant 24 h.
- Rodage des sucres à la rodeuse jusqu'à 30µm.
- Polissage des sucres (polissage au papier abrasif : 500, 800, 1000,1200 µm) puis à la pâte diamant pour mieux voir les minéraux.
- Observation des lames à l'aide de la microscopie optique ou microscopie électronique à balayage MEB.



Figure 42 : Le collage des sucres.

IV. TECHNIQUES EXPERIMENTALES UTILISEES

IV.1. Diffraction des rayons X

La technique la plus couramment utilisée pour l'étude de la minéralogie des géomatériaux est la diffraction des rayons X (DRX), qui utilise la loi de Bragg :

$$2d \sin\theta = \lambda n$$

avec,

- d : distance entre deux plans réticulaires voisins d'une même famille désignée conventionnellement par les indices de Miller (h, k, l)
- θ : angle des rayons incidents avec le plan réticulaire
- n : nombre entier désignant l'ordre de la réflexion
- λ : longueur d'onde du rayonnement X

CHAPITRE IV : ELABORATION ET PREPARATION DES ECHANTILLONS PRELEVES ET METHODES EXPERIMENTALES#

Connaissant n et θ , il est possible de calculer par la suite des distances réticulaires correspondantes à un minéral particulier (identification des minéraux d'un échantillon).

Les résultats d'un balayage de l'échantillon à différents angles incidents sont exprimés sur un diagramme donnant l'intensité I diffusée en fonction de l'angle θ . Le diagramme d'un minéral bien cristallisé présente des raies de diffraction, plus ou moins fines. Chaque espèce cristalline donne un diagramme de diffraction caractéristique, c'est-à-dire un ensemble de raies de diffraction dont la position et l'intensité correspondent à sa structure cristalline.

La diffraction des rayons X permet de déterminer la nature des phases cristallisées présentes dans un échantillon. La comparaison des diagrammes expérimentaux avec ceux de références répertoriés dans les bases de données permet de confirmer ou d'infirmer la formation de telle ou telle phase.

Nous avons utilisé, pour analyser nos échantillons, le diffractomètre model **X'PERT PRO PAN** (Figure 43), (Université de Bejaia), les conditions d'enregistrement sont :

- les rayons X produits par une anticathode de cuivre alimentée sous 40 KV et 30 mA ;
- le matériau d'anode est Cu, avec $\lambda_{Cu}=1,5406 \text{ \AA}$; Fente de divergence, fixe, 0,5 ;
- le diagramme des échantillons enregistré sur un domaine angulaire compris : 4-100° (2θ) par pas de 0,016, temps de comptage 10 s par pas ; Goniomètre de configuration téta-2téta



Figure 43 : Le diffractomètre utilisé de type **X'PERT PRO PAN**.

IV.2. Microscopie optique

L'étude de la microstructure a comme objectif de vérifier les effets des traitements thermiques. La préparation métallographique des échantillons consiste en :

- a) La préparation des lames minces (voir partie préparation des échantillons de ce chapitre).
- b) Le polissage qui est mécanique avec du papier abrasif (500, 800, 1000 et 1200 μm), disposé sur les disques d'une polisseuse. Après chaque polissage, les échantillons sont nettoyés de tous résidus avec de l'eau.

L'observation métallographique de nos échantillons a été réalisée à l'aide d'un microscope optique **OLYMPUS** de type BX51M, (Figure 44) équipé d'une caméra photographique qui permet l'obtention d'un grand nombre de photos des différentes microstructures.



Figure 44 : Le microscope optique de type **OLYMPUS** BX51M.

IV.3. Microscope électronique à balayage

Procédure expérimentale

Le microscope électronique à balayage utilisé est de type environnemental (ESEM), ce MEB (Laboratoire du génie des procédés, Université de Bejaia), un **Quanta 200**, de la société FEI permet d'observer les échantillons en mode classique (High Vacuum, 10^{-4} Pa), (Figure 45), il permet également de travailler à pression de vide partielle en atmosphère gazeuse (2600Pa en

CHAPITRE IV : ELABORATION ET PREPARATION DES ECHANTILLONS PRELEVES ET METHODES EXPERIMENTALES#

mode ESEM). Une certaine quantité de gaz (azote, vapeur d'eau, gaz réducteur ou oxydant) peut être présente dans la chambre. Contrairement au MEB conventionnel, cet appareil permet :

- d'utiliser des échantillons sans aucune préparation préalable comme les métallisations à l'or ou au carbone qui handicapent l'observation et empêchent l'analyse des éléments légers (à partir du bore) ;
- de préserver les structures des échantillons et leur contenus en eau (matériaux, sols, sédiments, plantes, animaux) en évitant les effets destructeurs d'un vide poussé ;
- d'observer les liquides directement : gouttelettes d'eau, huiles.

Le MEB « ESEM » est équipé d'un système de micro-analyse par dispersion d'énergie (EDS) (Quan Tax QX2, ROENTEC), il permet les analyses chimiques (ponctuelles ou cartes de répartition) non destructives des échantillons variés (sols, sédiments, roches...). Un détecteur Centaurus permet l'observation en cathodoluminescence. Son principe est d'utiliser un faisceau électronique très fin qui balaie point par point la surface de l'échantillon sous vide. Le signal reçu par le détecteur est synchronisé avec celui du faisceau incident.



Figure 45 : Le Microscope électronique à balayage utilisé de type environnemental (ESEM).

IV.4. Mesure de la microdureté

L'étude de la microdureté pour les matériaux non métalliques tels que les roches et toute sorte de granulats est réalisée sur l'échelle de MOHS qui est différente de la microdureté VICKERS car elle mieux appropriée pour la fragilité des roches devant celle des métaux. Mais faute de moyens techniques et en l'absence de l'appareil de microdureté MOHS, on s'est vu obligé de travailler de façon très prudente sur l'appareil de la microdureté VICKERS.

- La technique de la microdureté Vickers

Les essais de la microdureté Vickers consistent à étudier les longueurs des diagonales de l'empreinte laissée à la surface de l'échantillon après application d'une charge constante d'un pénétrateur en forme de pyramide droite à base carrée en diamant, (Figure 46). Le temps de mise en charge est de 15 secondes, tout comme le temps de maintien de la charge. L'empreinte est d'autant plus grande que le matériau est mou.

La dureté Vickers est donnée par la formule :

$$HV = F / S \text{ où}$$

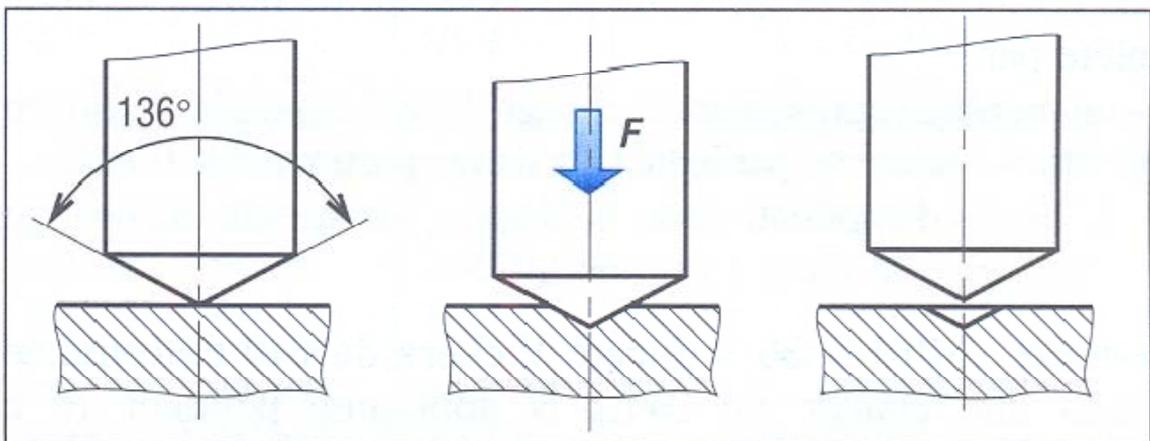
$$S = 1/2 \times d^2 / \sin 136^\circ / 2 \text{ d'où: } HV = 1,8544 P / d^2$$

avec,

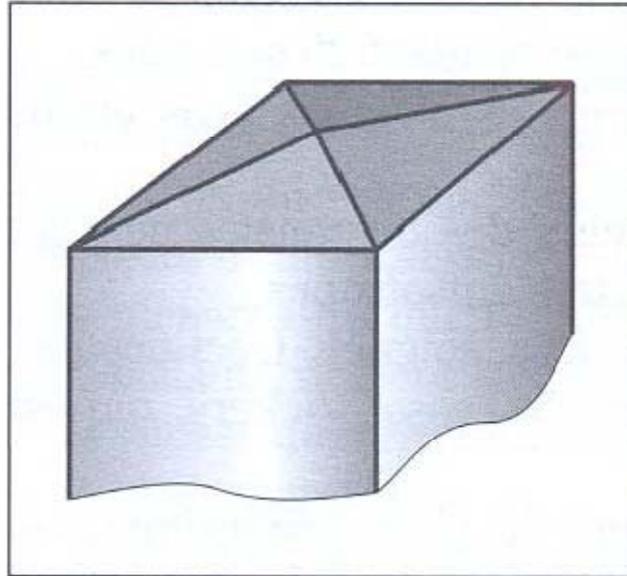
F : charge d'essai en kilogramme force à $\pm 1\%$,

S : la surface indentée en mm².

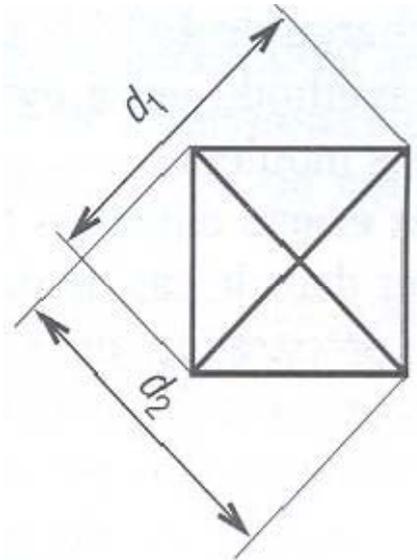
d = (d₁ + d₂) / 2 (en mm).



a) Principe de l'essai Vickers



b) Géométrie de pénétrateur ; Pyramide en diamant de base carrée.



c) Mesure de l'empreinte.

Figure 46 : Essai de dureté Vickers.

CHAPITRE IV : ELABORATION ET PREPARATION DES ECHANTILLONS PRELEVES ET METHODES EXPERIMENTALES#

Le pénétrateur de type Vickers est utilisé pour les essais de dureté et les essais de microdureté. Les essais de dureté correspondent à des charges comprises entre 5 et 100 kilogrammes force et les essais de microdureté correspondent à des charges inférieures à 1000g et relatent la dureté sur des domaines microscopiques.

Dans notre étude, nous avons utilisé plusieurs charges entre 200g à 2Kg force. L'appareil utilisé de marque **ZWICK** (au laboratoire des essais mécaniques de l'université de Jijel), (Figure 47) est équipé d'un microscope optique pour permettre de positionner l'empreinte sur la face désirée ; il est connecté à un ordinateur permettant l'acquisition automatique des valeurs de microdureté HV.



Figure 47 : La machine du la microdureté **ZWICK**.

IV.5. Mesure de porosité

La porosité totale d'une roche est définie comme le rapport du volume des vides sur le volume total de la roche. Cette grandeur est exprimée en pourcentage:

$$N=100 \times V_{\text{vides}} / V_{\text{total}} = 100 \times (V_{\text{total}} - V_{\text{solide}}) / V_{\text{total}} \dots\dots\dots (\text{Eq.1})$$

Avec :

Nt : porosité totale

Vv : volume vide

Vt : volume totale

CHAPITRE IV : ELABORATION ET PREPARATION DES ECHANTILLONS PRELEVES ET METHODES EXPERIMENTALES#

Elle peut aussi s'exprimer en fonction de la densité apparente sèche ρ_a qui représente la masse des minéraux rapportée au volume total de la pierre et de la densité du squelette solide ρ_s qui représente la masse des minéraux rapportée au volume total des grains :

$$N = 100 \times (1 - \rho_a / \rho_s) \dots\dots\dots \text{(Eq. 2)}$$

La porosité totale et les différentes densités peuvent être mesurées par la méthode de la pesée hydrostatique qui est basée sur le principe de la poussée d'Archimède sur un échantillon poreux saturé sous vide et immergé dans l'eau. Les roches sédimentaires ne possédant pas ou peu de porosité occluse, la porosité accessible à l'eau sous vide correspond à la porosité totale du matériau. Les éprouvettes sont mises à sécher à l'étuve à 105°C jusqu'à un poids constant, puis pesées (**Ms**). Elles sont placées dans une enceinte reliée à une pompe à palette qui permet d'obtenir un vide primaire pendant 1 heure (figure 48). Parallèlement, dans une seconde enceinte reliée à la première, de l'eau distillée est désaérée pendant 1 heure et 19 heures. Ensuite, l'eau est admise dans la première enceinte où l'imbibition sous vide des éprouvettes a lieu. Le niveau d'eau est ajusté de sorte qu'il ne dépasse jamais la frange capillaire. A la fin, une pesée hydrostatique des éprouvettes saturées immergées dans l'eau (**Mhyd**) est effectuée ainsi qu'une pesée à l'air des échantillons saturés essuyés avec un chiffon humide, telle que la peau de chamois utilisée pour notre essai, (**Msat**).

La densité de l'eau étant égale à 1, les différentes densités et la porosité totale sont calculées de la façon suivante :

$$\rho_a = Ms / \rho_{eau} (Ms - M_{hyd}) \dots\dots\dots \text{(Eq. 3)}$$

$$\rho_s = Ms / \rho_{eau} (Msat - M_{hyd}) \dots\dots\dots \text{(Eq.4)}$$

$$N_{tot} = Msat - Ms / Msat - M_{hyd} \dots\dots\dots \text{(Eq.5)}$$

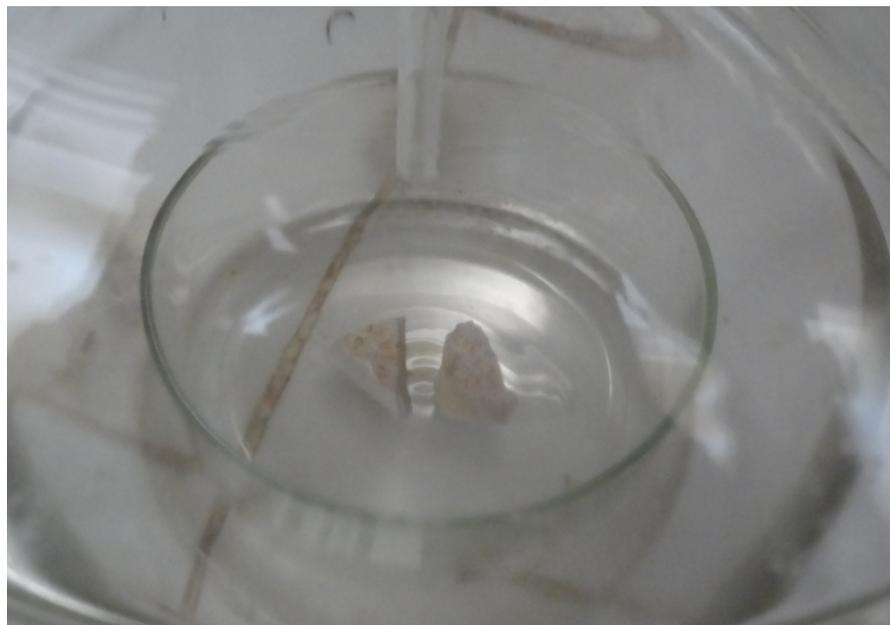


Figure 48 : Montage de mesure de la porosité à l'eau.

CHAPITRE V
RESULTATS EXPEREMENTAUX ET
INTERPRETATIONS

CHAPITRE V**RESULTATS EXPEREMENTAUX ET INTERPRETATIONS****I. ETUDE PAR LA DIFFRACTION DES RAYONS X**

L'identification des différents minéraux constitutifs des roches sédimentaires qui sont pour notre étude les calcaires blancs, les calcaires gris et l'argile a été réalisée par diffraction des rayons X en réflexion sur poudre ($\lambda_{Cu} = 1,5406 \text{ \AA}$). Les diffractogrammes concernant le calcaire blanc et le calcaire gris sont représentés respectivement sur les figures 49 et 50. L'analyse minéralogique montre que dans les calcaires blancs et calcaires gris de djebel kellal, comme dans la plupart des roches sédimentaires, les principales phases cristallines présentes sont la calcite (carbonate de calcium) : $CaCO_3$, le quartz SiO_2 , la Magnésite ou Carbonate de magnésium $MgCO_3$ et une faible quantité d'oxydes de fer et d'alumine : Fe_2O_3 , Al_2O_3 .

L'apparition d'un premier pic à grande intensité dans les calcaires blancs correspond aux grains de calcite suivant le pic (002) suivi par une suite de pics de quartz reflétant l'importance en quantité de SiO_2 dans les calcaires blancs et un peu moins dans les calcaires gris.

Ces spectres montrent aussi une grande différence entre les intensités des pics : (002) pour les calcaires blancs et (104) pour les calcaires gris par rapport aux autres pics, moins intenses. Ces résultats sont en bon accord avec les travaux de Kévin Beck [40].

Mais contrairement pour l'Argile du tunnel de djebel el ouahch constituée de Quartz comme phase principale : (SiO_2), et des minéraux argileux comme la mullite et kaolinite, (figure 51).

Ce spectre montre aussi une grande différence entre l'intensité du pic de quartz (-321) et celle des autres ainsi que le nombre important de pics de SiO_2 .

L'identification des phases cristallines montre la présence du quartz, et d'autres éléments en proportions plus au moins variable tels que la Mullite et la Kaolinite.

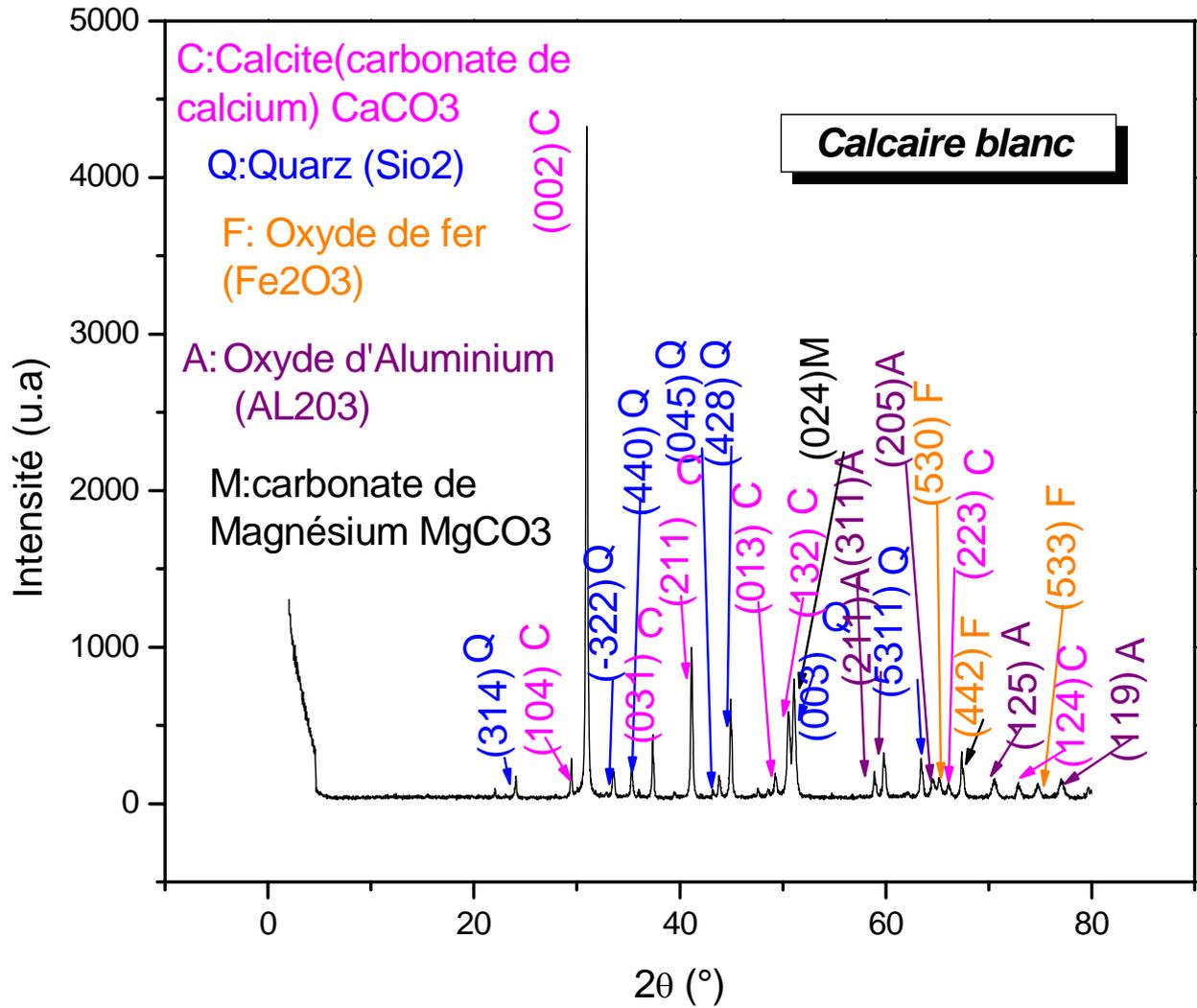


Figure 49 : Diffractogramme de la poudre de calcaire Blanc.

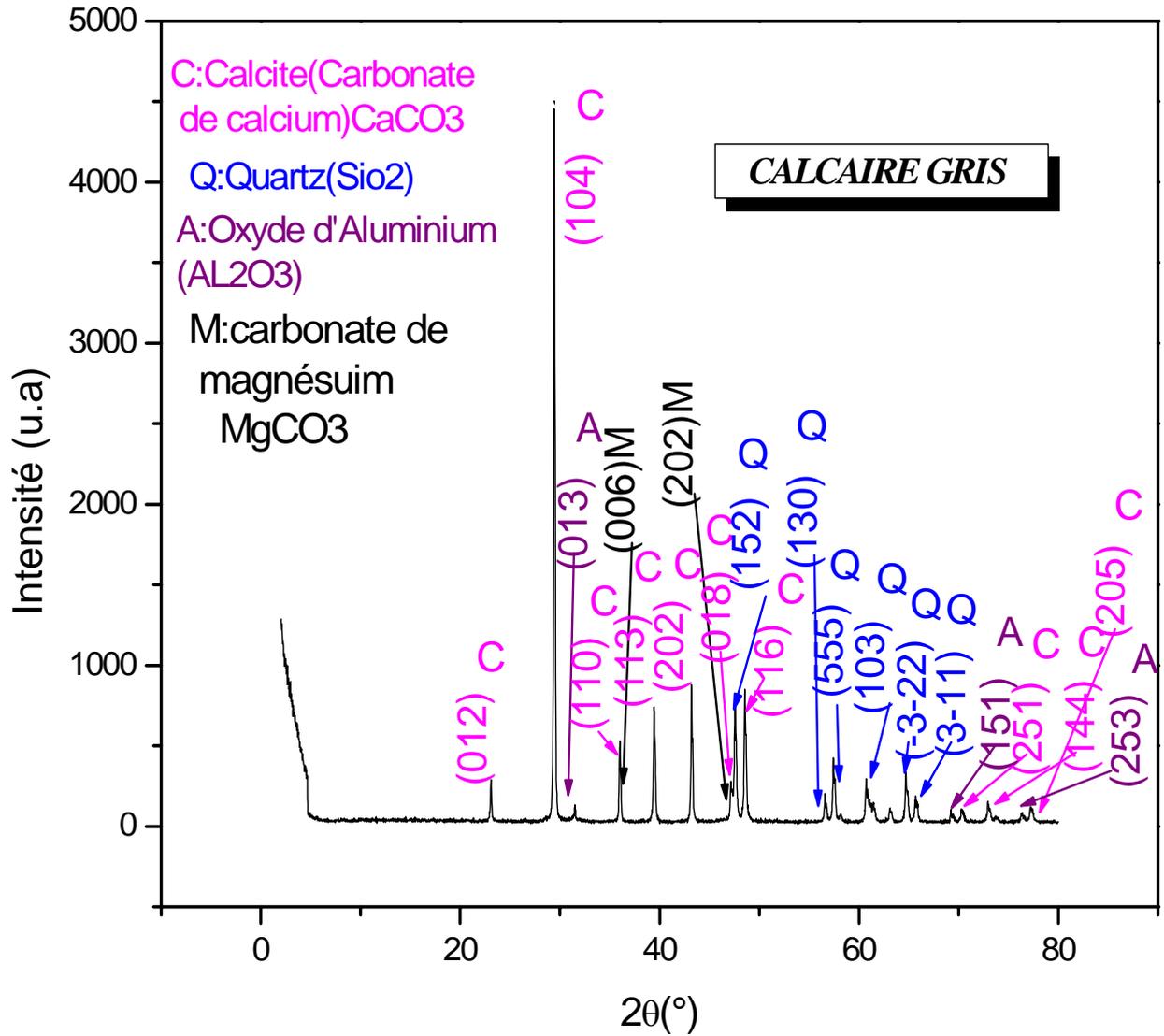


Figure 50 : Diffractogramme de la poudre de calcaire gris.

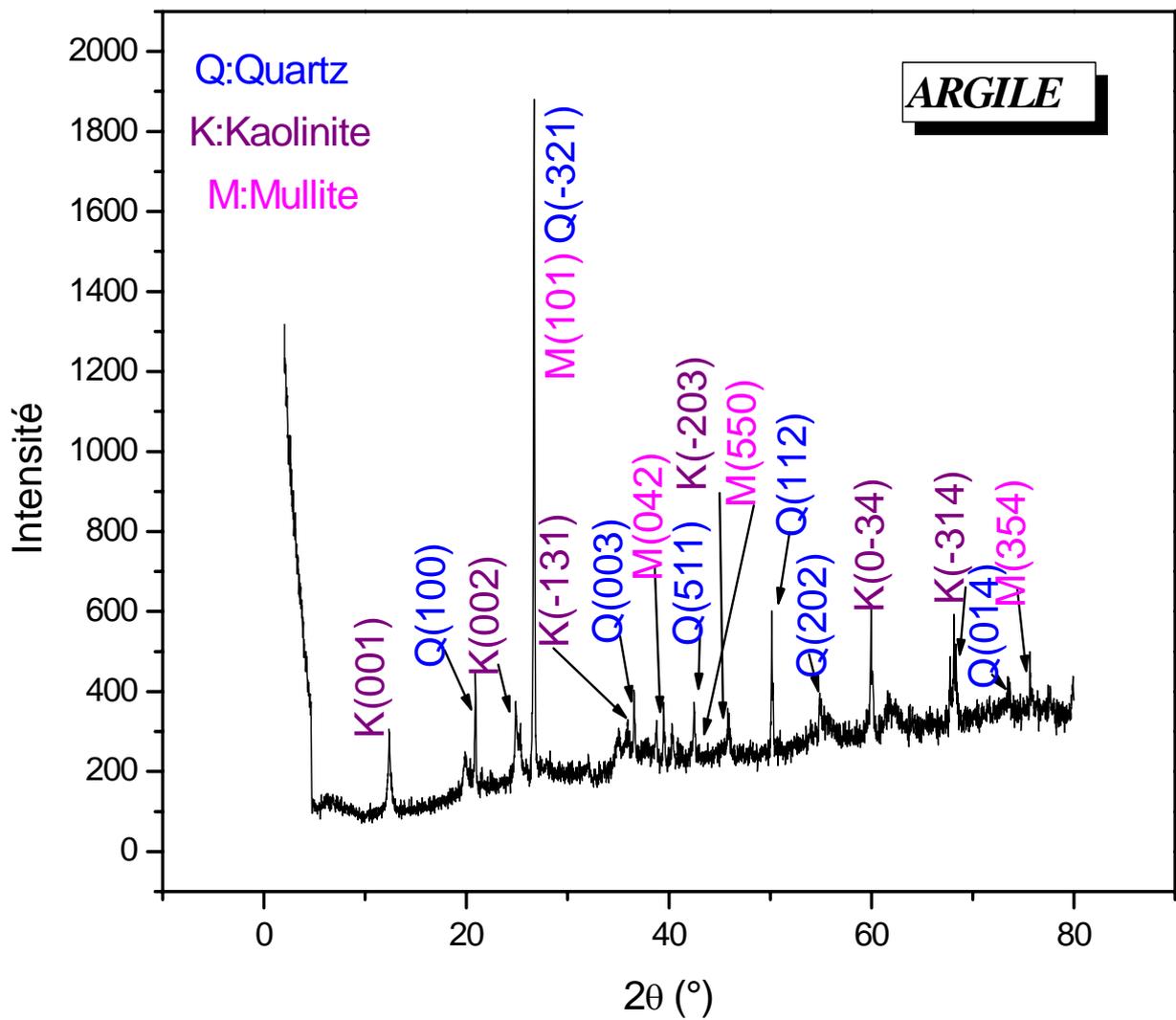


Figure 51 : Diffractogramme de la poudre d'Argile.

II. ETUDE PAR MICROSCOPIE ELECTRONIQUE A BALAYAGE (MEB)

Les grains solides constituants des pierres étudiées qui sont de nature et de proportion différentes sont visualisés par microscopie électronique à balayage, ce qui permet d'observer la taille et la forme de ces grains. La variété des minéraux présents, leur agencement et leur morphologie de surface sont représentés pour les échantillons de calcaire blanc et calcaire gris respectivement sur les figures 52 et 53 par des micrographies de microscopie électronique à balayage acquises à différents grossissements.

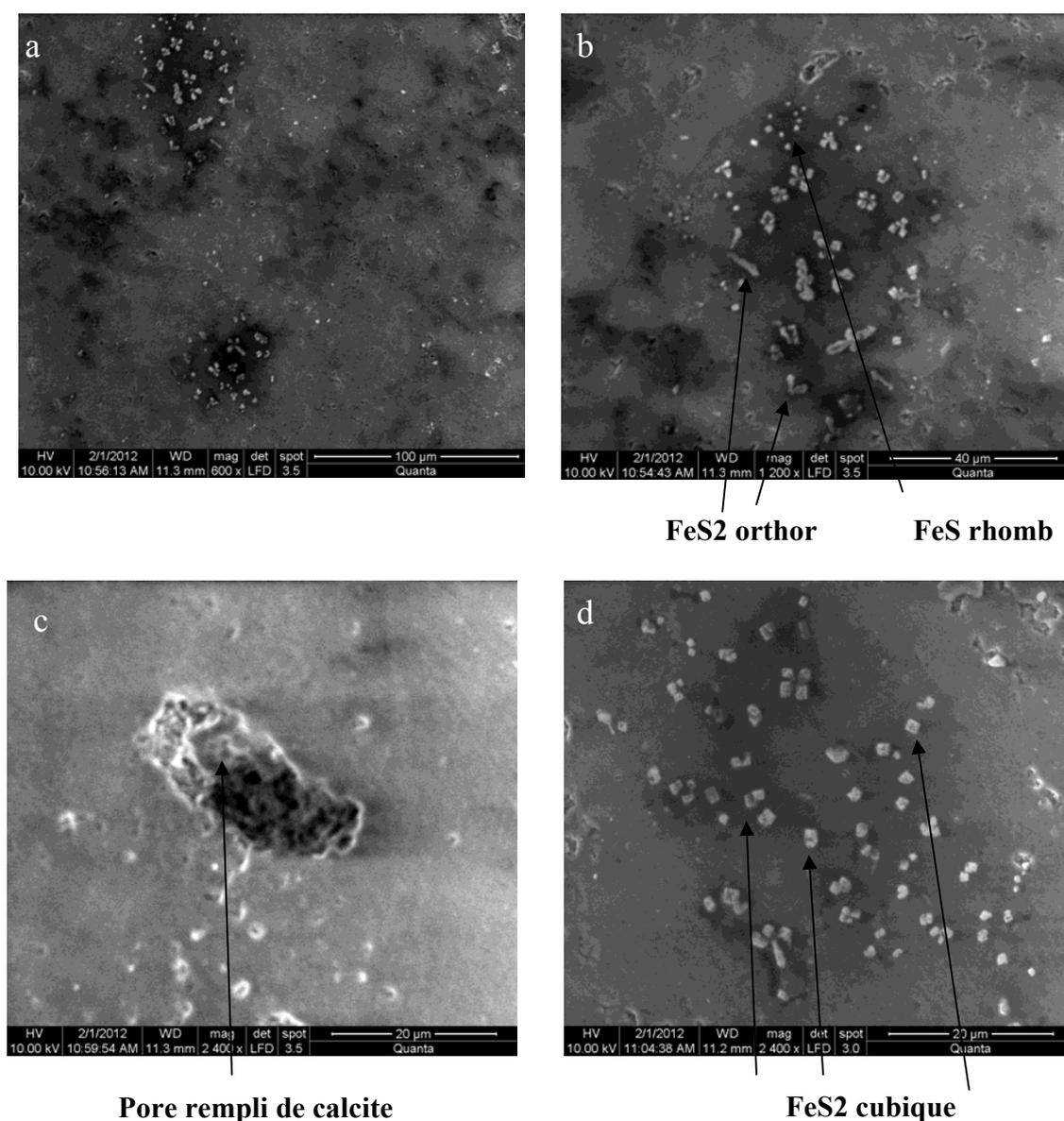


Figure 52 : Micrographies obtenues par MEB de l'échantillon calcaire blanc (a : x600, b : x1200, c et d : x2400).

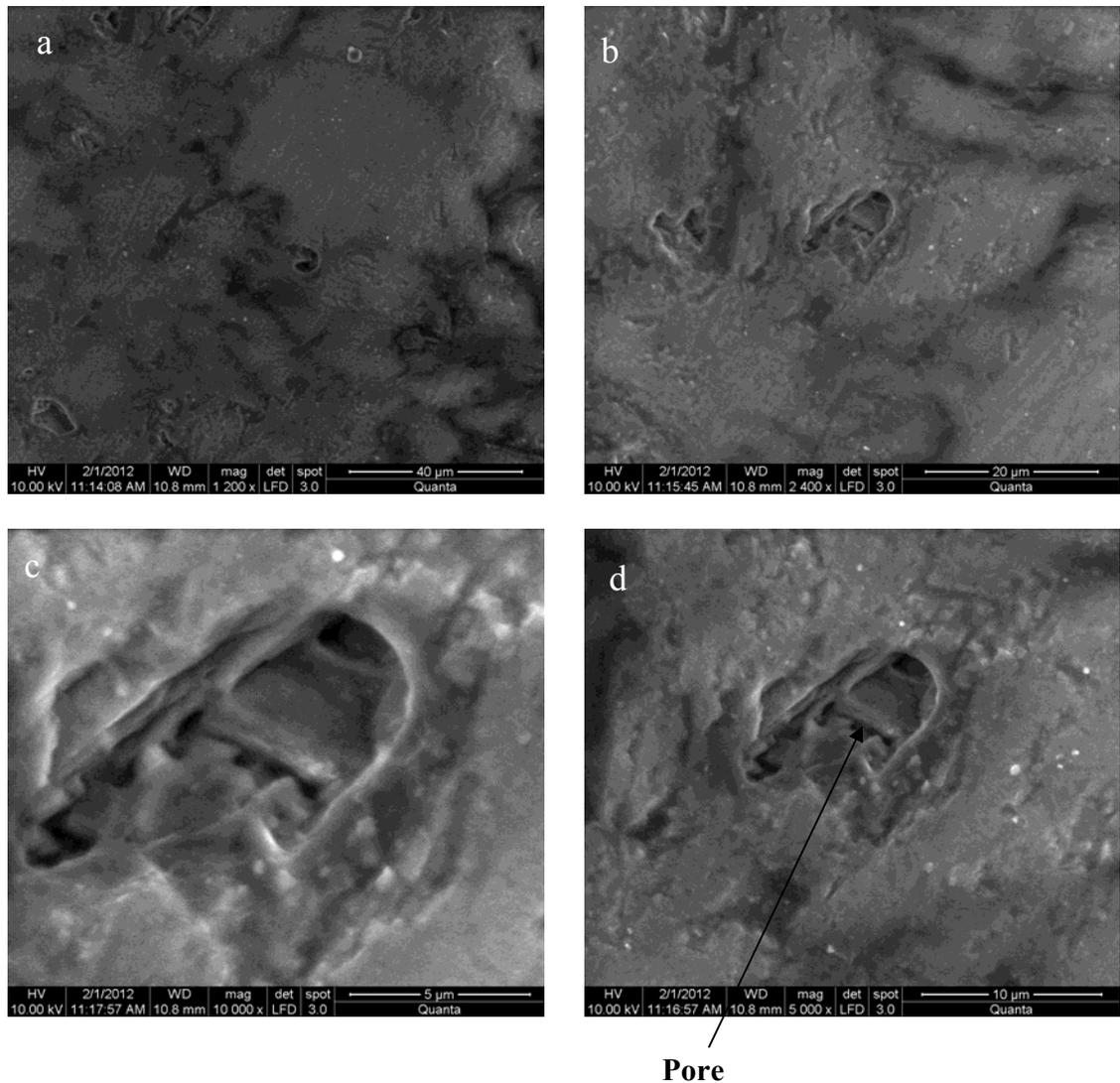


Figure 53 : Micrographies obtenues par MEB de l'échantillon calcaire gris (a : x1200, b : x2400, c : x10000 et d : x5000).

L'observation au Microscope Electronique à Balayage (MEB) est réalisée sur des échantillons de roches calcaires. Cette observation présente l'avantage de nous permettre de visualiser des surfaces, et de mettre en évidence des détails d'une grande finesse surtout pour

caractériser les espaces inter et intragranulaires (le premier espace entre les grains et au sein de la phase de liaison, le deuxième est dans les grains constitutifs).

Le calcaire blanc et le calcaire gris sont principalement composés de calcite (CaCO_3).

Les observations sur sections polies par microscopie électronique à balayage sont présentées respectivement sur les figures **52 (a, b, c, d)** et **53 (a, b, c, d)**. On peut apprécier la taille des différents minéraux ainsi que les pores résultant de leur arrangement.

On remarque pour les calcaires blancs, sur la figure 52-b, l'existence de deux formes de sulfate de fer : la pyrite FeS_2 qui se présente sous forme d'aiguilles avec une structure orthorhombique et FeS en grains arrondies et en amas sous la forme rhomboïdales sur un fond de carbonates CaCO_3 .

Sur la figure 52-d, apparait la pyrite FeS_2 sous la forme cristalline cubique, la figure 52-c contient un pore rempli de calcite.

Un problème technique s'est produit lors de la préparation des échantillons des calcaires. Ils ont été tous métallisés au sein de notre laboratoire, ramenés au laboratoire du génie des procédés à l'université Abderahmane Mira de Béjaia, leur microscope électronique à balayage MEB étant environnementale et ne nécessite pas de métallisation, l'analyse a été effectuée sur un calcaire blanc poli et non métallisé, d'où les figures 52, a, b, c et d donnant des informations conséquentes.

Par contre pour les calcaires gris métallisés, l'information au MEB n'est pas vraiment significative, un aspect boueux apparait sur les micrographies (a, b, c et d) de la figure 53. On remarquera aussi que sur la figure 53-d, le calcaire gris contient des pores.

III. ETUDE PAR MICROSCOPIE OPTIQUE

L'élaboration des lames minces à partir des roches sédimentaires de calcaire n'a pas été facile à cause de l'absence de la rectifieuse (rodeuse). Heureusement, qu'au laboratoire du génie géologique à l'université de Jijel, on a pu coller les lames sur les portes échantillons à l'aide d'une résine et d'un durcisseur adéquat et mais on n'a pas pu les amincir. Ce qui nous a obligé à faire un polissage manuel à l'aide de papier abrasif (400, 800, 1000, 1200 μm), suivi par la pâte diamant. Cette méthode de travail nous a permis d'avoir des lames qui ne sont pas suffisant minces ; par conséquent, les micrographies obtenues ne sont pas vraiment nettes et leurs exploitations donnent peu d'informations sur la microstructure de nos calcaires respectivement

gris et blancs (Figures 54 et 55). Les analyses réalisées en lumière réfléchiée montrent que d'autres éléments que le quartz (figure 54) pour les calcaires gris :

- la Pyrite (FeS_2), le contour rouge-orange dans un pore qui contient de la calcite, (figure 54 a et c) ;
- des pores remplis de calcite (figure 54-b) ;
- puis une matrice carbonatée (figure 54-c), qui représente la base ou le ciment qui lie les différents grains de CaCO_3 à des tailles variables pour les calcaires d'une manière générale.

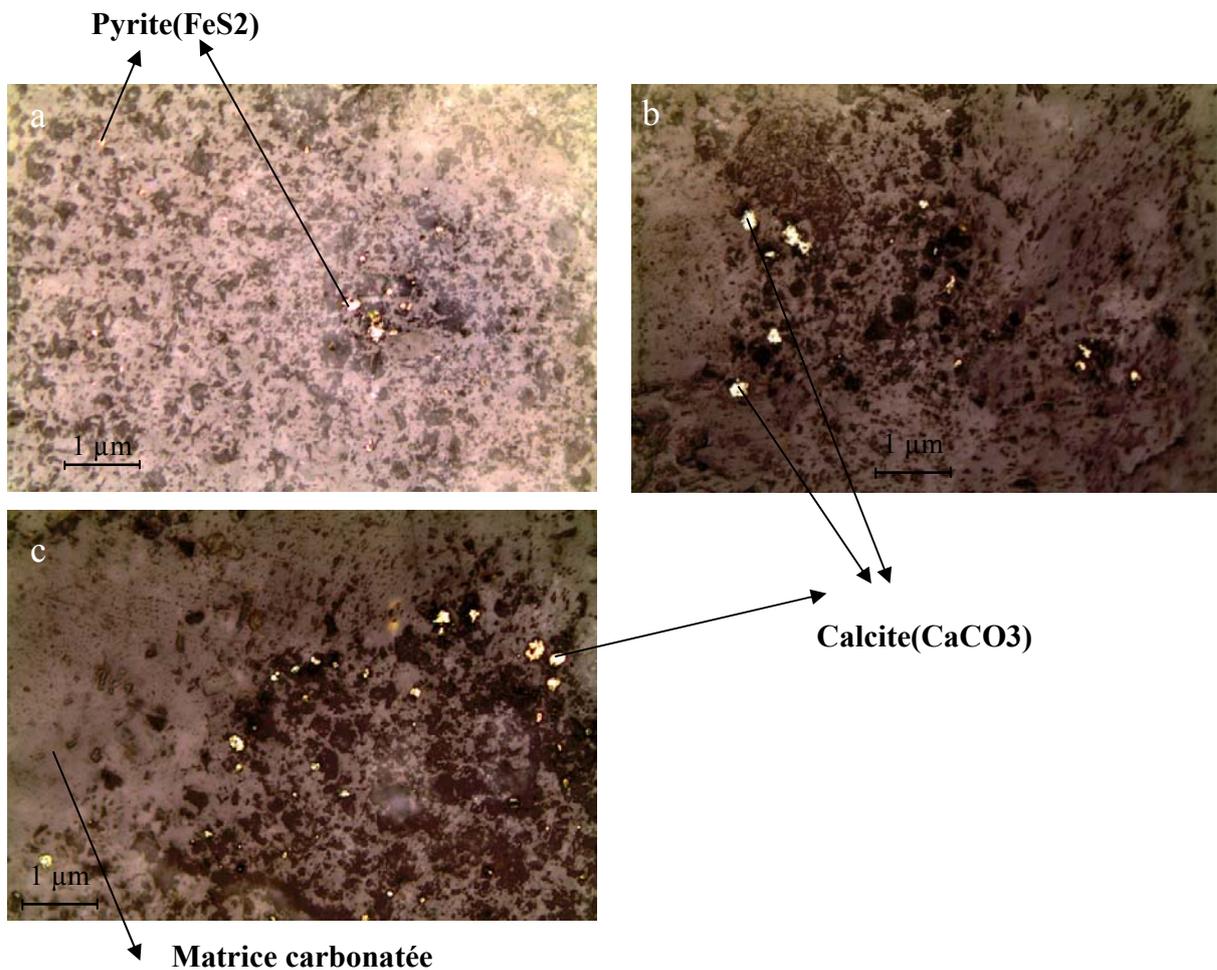


Figure 54 : Micrographies obtenues de calcaire gris.

L'observation en microscopie optique est complémentaire de l'observation en microscopie électronique à balayage (figures 52 et 53) car certains minéraux ne peuvent pas être distingués en microscopie électronique à balayage.

La pierre de calcaire est caractérisée par observation directe au microscope optique d'une série de lames minces. Cet examen a pour but de permettre une identification pétrographique précise de la roche (nature, structure et taille des éléments), ainsi qu'une description qualitative du milieu poreux tel qu'il apparaît en lames minces [41].

Pour les images optiques prises sur les calcaires blancs, la description est presque la même que celle faite sur les calcaires gris, avec toujours une matrice carbonatée comme base sur les 4 images prises, des traces de reste de pâte d'alumine de polissage faite d'un rinçage soigneux (figure 55-a), la présence de la calcite dans les pores (figure 55-b), des oxydes (figure 55-c) certainement Fe_2O_3 puis la présence d'une fissure remplie de $CaCO_3$ après sa formation (figure 55-d).

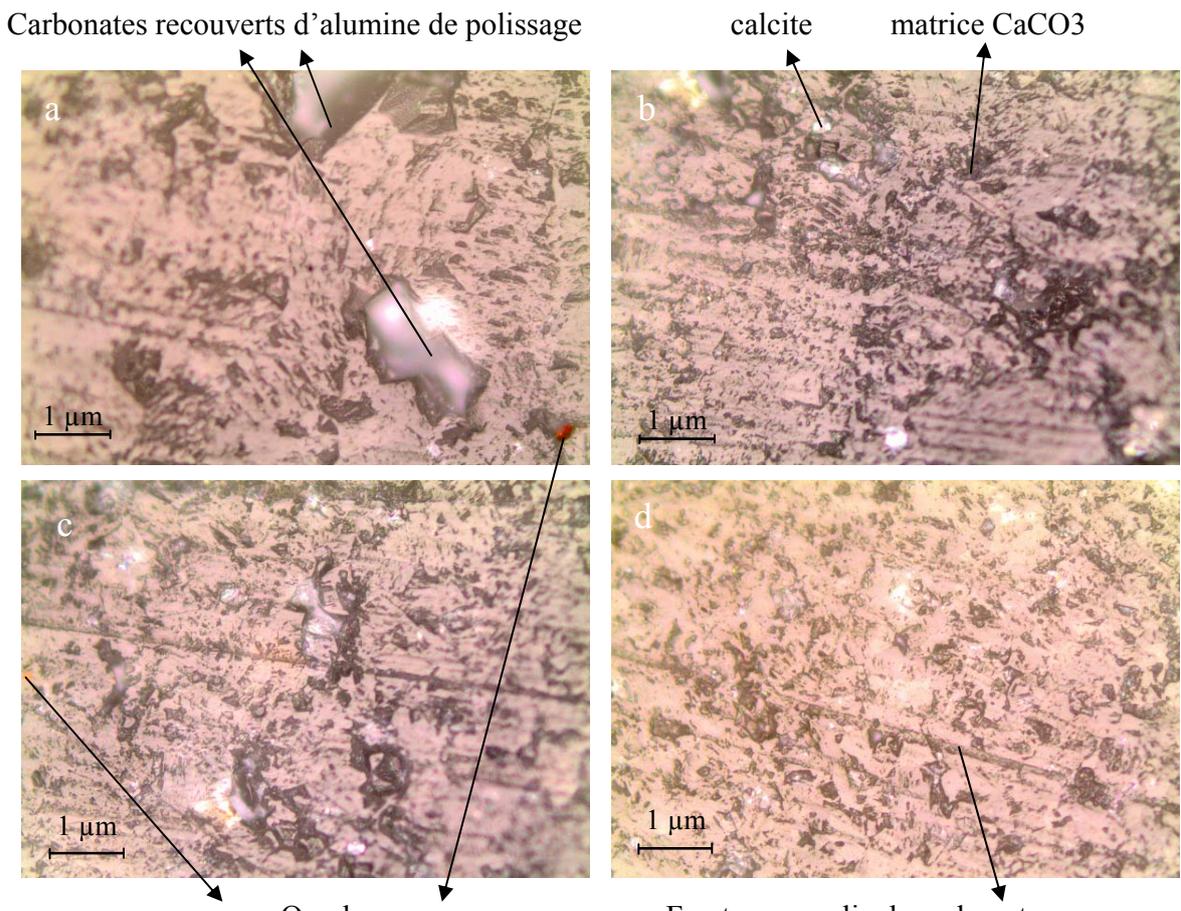


Figure 55 : Micrographies optiques de calcaire Blanc.

Pour des raisons de précision et de bonne appréciation, d'autres lames ont été préparées et envoyées au laboratoire de géologie de Tébessa pour les passer à la rectifieuse et les rendre aussi minces que possibles.

Un polissage soigné sur poudre de carbure de silicium SiC (de granulométrie 60 et 90 μm) suivi d'un passage des lames à l'ultrasons (2 x 15mn) pour éliminer le carbure de silicium des éventuels pores et enfin un polissage à l'alumine, a permis d'avoir des lames minces visibles en lumière polarisée et réfléchi.

Nous avons obtenu en utilisant la microscopie optique sous deux lumières différentes selon l'échantillon qui se présente les micrographies suivantes (figures 56-59).

Les images prises sur les calcaires blancs en lumière réfléchi (figure 56), présentent :

- une fissure remplie de carbonates (figure 56-a) ;
- des carbonates à différentes tailles de grains et de la calcite dans les pores (figure 56-b) ;
- des oxydes, certainement de Fe_2O_3 (figure 56-c).

En lumière polarisée (figure 57), on constate la présence :

- de la calcite dans les pores et des carbonates CaCO_3 sur la figure 57-a ;
- des oxydes dans les figures 57b et 57c, c'est certainement la ferrite Fe_2O_3 .

Les images prises sur des lames minces de roches de calcaire gris présentent presque les mêmes résultats de ceux du calcaire blanc. Ainsi en lumière réfléchi, on observe :

- une phase d'oxyde qui est certainement Fe_2O_3 (figure 58-a), ce résultat est confirmé par la diffraction des rayons X ;
- des carbonates CaCO_3 à différentes tailles de grains (figure 58b et 58c) ;
- des fossiles marins (figure 58d), ce qui conforte la présence de la région de djebel kellal dans un bassin marin, il y a de cela très longtemps.

En lumière polarisée (figure 59), apparaissent des bulles d'air emprisonnées entre les sucres, la lame de verre et la colle durant l'élaboration des lames minces.

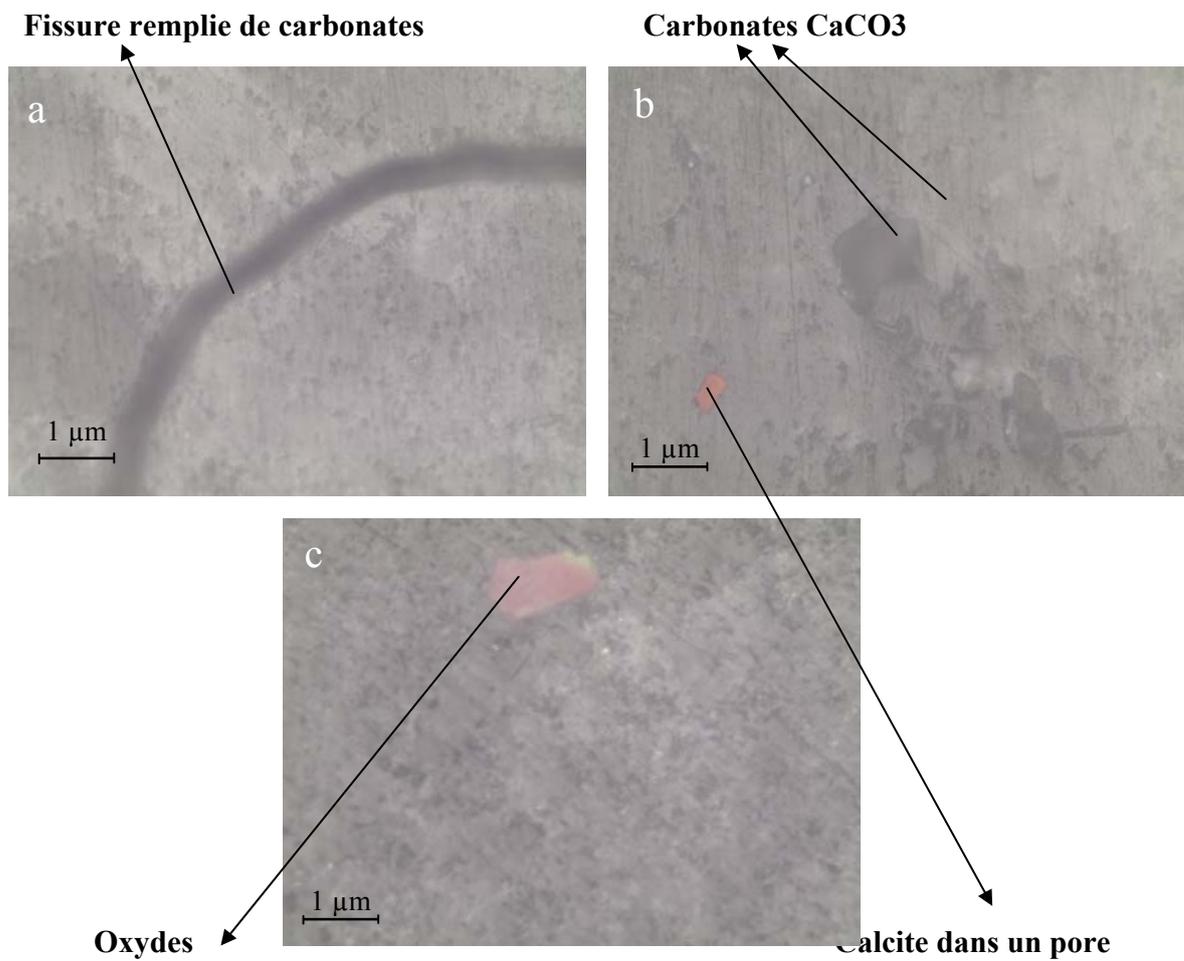


Figure 56 : Images acquises par Microscopie Optique de lumière réfléchie de zone de roche Calcaire Blanc.

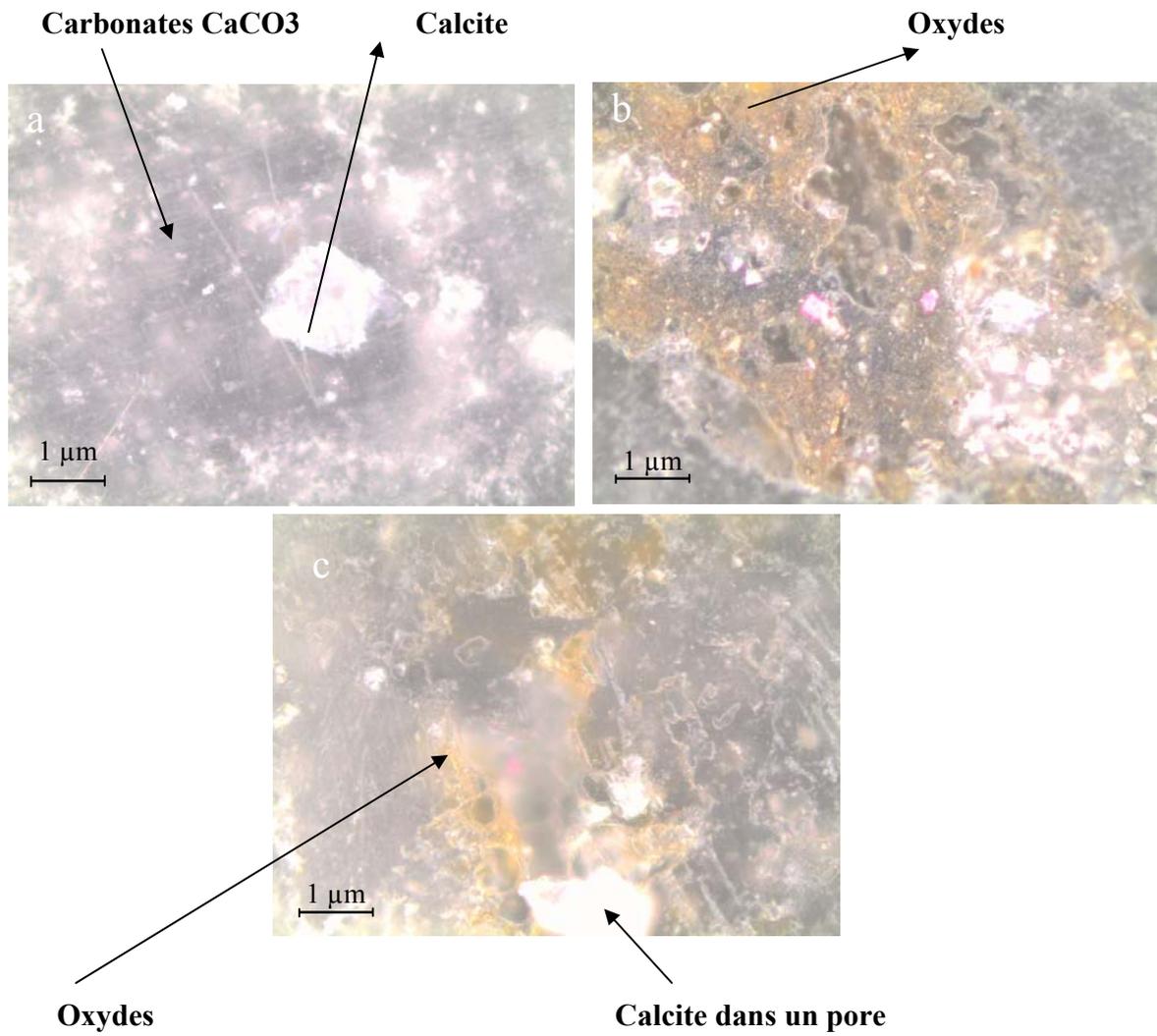


Figure 57 : Images acquises par Microscopie Optique de lumière Polarisée de zone de calcaire Blanc.

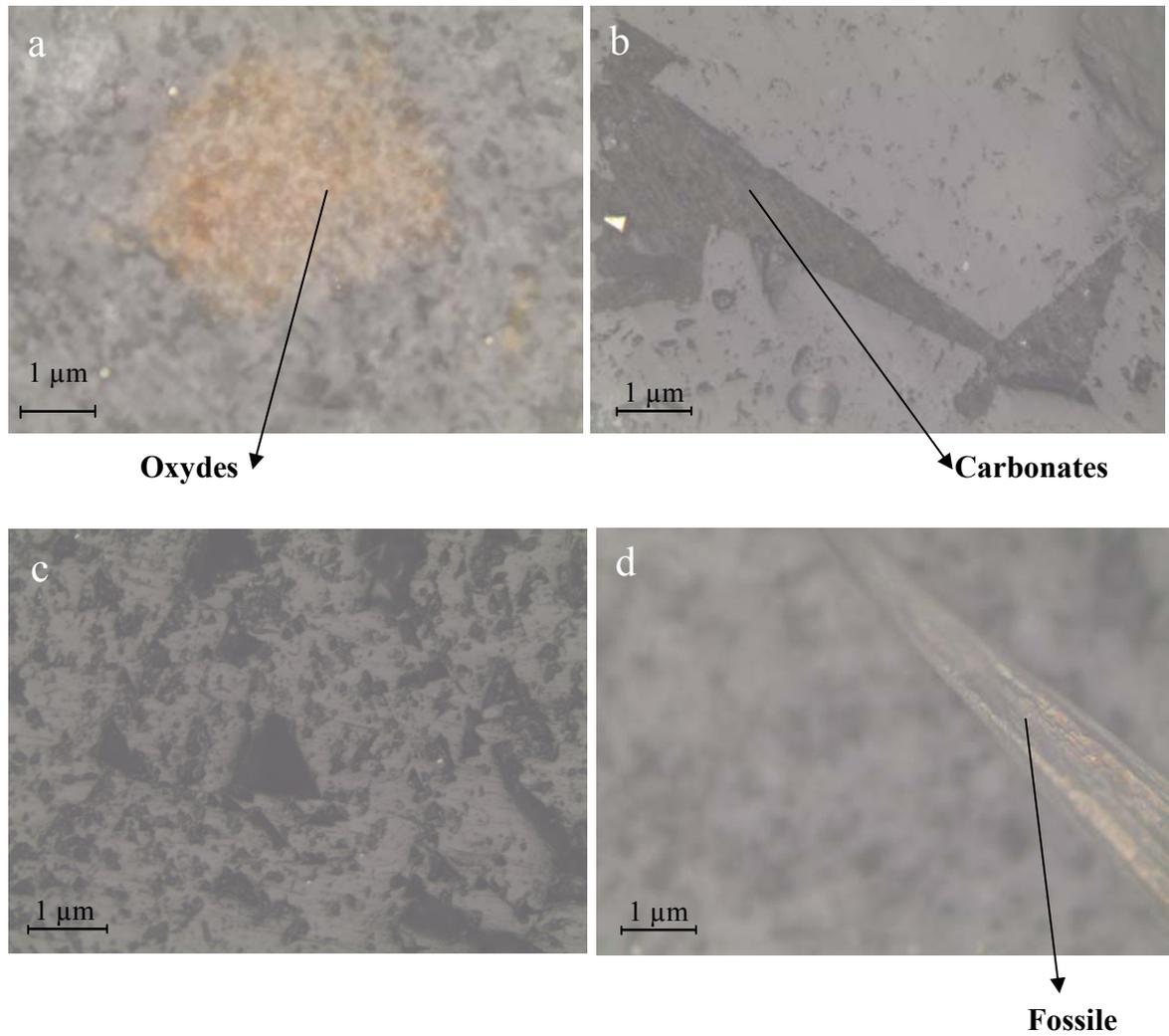


Figure 58 : Images acquises par Microscopie Optique de lumière réfléchie de zone de calcaire gris.

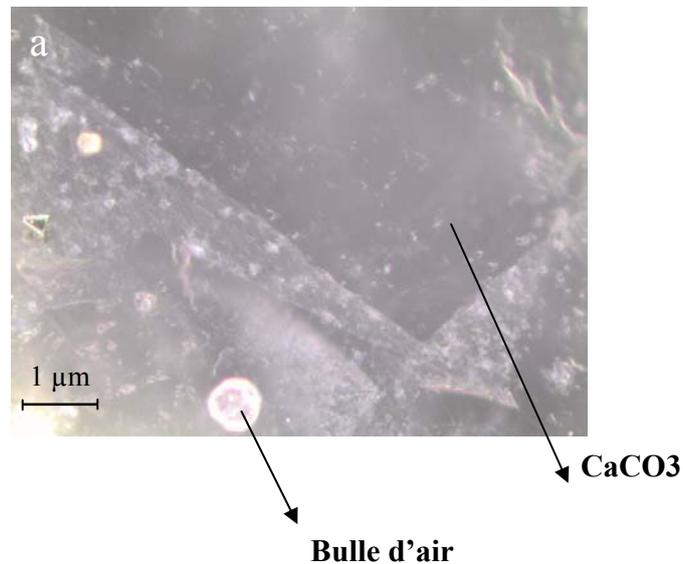


Figure 59 : Image acquise par Microscopie Optique de lumière polarisée de zone de calcaire gris.

La synthèse des résultats de la microscopie montrent bien que les phases principales sont bien la Calcite, le Quartz avec la présence des fossiles, de la pyrite et des oxydes métalliques (de fer et d'aluminium) :

➤ Les roches sédimentaires (pierre calcaire blanc et calcaire gris) sont composées d'éléments détritiques (fragments de roches et de minéraux) et de bioclastes (fragments de coquilles) liés par une matrice essentiellement calcite (carbonate de calcium). De nombreux pores de taille et de forme géométrique variables apparaissent entre les éléments solides de la roche. La nature des éléments détritiques et leur proportion par rapport aux bioclastes (les fossiles) ainsi que l'abondance de la matrice changent considérablement d'un échantillon à l'autre.

- La lame mince observée au microscope (à divers agrandissements) donne la possibilité de mieux reconnaître la surface. Cette vision plus précise amène à définir avec certitude la plupart des minéraux ou fossiles qui composent la roche. Le quartz est facilement observable au microscope alors que les argiles (le mot argile définit un groupe de minéraux) ne sont pas identifiables parce qu'ils sont beaucoup trop petits.
- La pierre de calcaire blanc et calcaire gris ne présentant que deux phases principales (quartz et calcite), la diversité et la répartition des grains est tellement importante et complexe qu'une cartographie d'éléments principaux (silicium, calcium, aluminium, fer) a été réalisée sur la même zone observée par microscopie optique (Figure 57). Les signaux du silicium et du calcium montrent que les grains sont principalement du quartz, de la calcite, et des débris coquillés. Les signaux des oxydes l'aluminium et du fer confirment l'observation par microscopie optique pour l'identification des grains de calcaire, L'information intéressante qu'apporte cette cartographie en plus de l'imagerie est la répartition des phases les plus fines. En effet, on peut voir que les calcaire sont toujours liées à de nombreux cristaux de calcite, et témoignant donc de la présence d'autres minéraux argileux et les fossiles.
- L'étude des lames minces sous microscope polarisant apporte une bonne connaissance de la texture et de la composition minéralogique des différents groupes de roches. Les descriptions des observations microscopiques présentées en figure 57-59.

IV. ETUDE PAR MESURES DE MICRODURETE HV

La dureté peut être définie par la résistance à l'enfoncement d'un pénétrateur dont la zone d'influence intéresse un nombre statistiquement grand de cristaux.

Les Figures 60 et 61 représentent la variation de la microdureté HV en fonction de la charge différente du calcaire blanc et du calcaire gris.

Les mesures de la microdureté des échantillons étudiés montrent que la valeur de la dureté est élevée quand les charges utilisées au cours des essais sont petites, par contre, si les charges appliquées augmentent, la valeur de la microdureté devient plus petite.

Les résultats de la dureté du calcaire blanc (figure 60) montrent qu'elle décroît jusqu'à une valeur limite qui est égale à 115.87 N/mm² pour une charge de 0,9kg, cette valeur de la dureté

est inférieure à celle obtenue pour la même charge de l'échantillon du calcaire gris 304,7 N/mm² (voir Figure 61).

La dureté est influencée par les vides et l'intensité des liaisons intergranulaires.

La dureté des minéraux peut être définie et mesurée avec une bonne précision par la méthode Vickers. Cette méthode peut également donner des résultats très intéressants pour les roches.

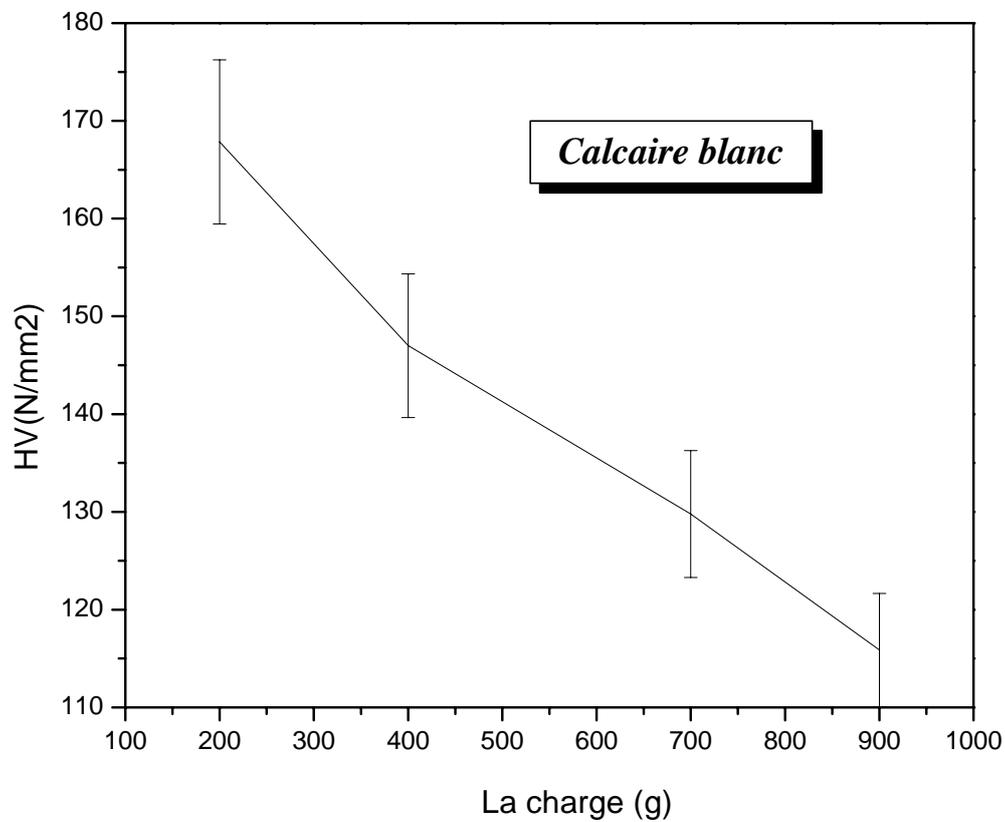


Figure 60 : Variation de la microdureté du calcaire blanc.

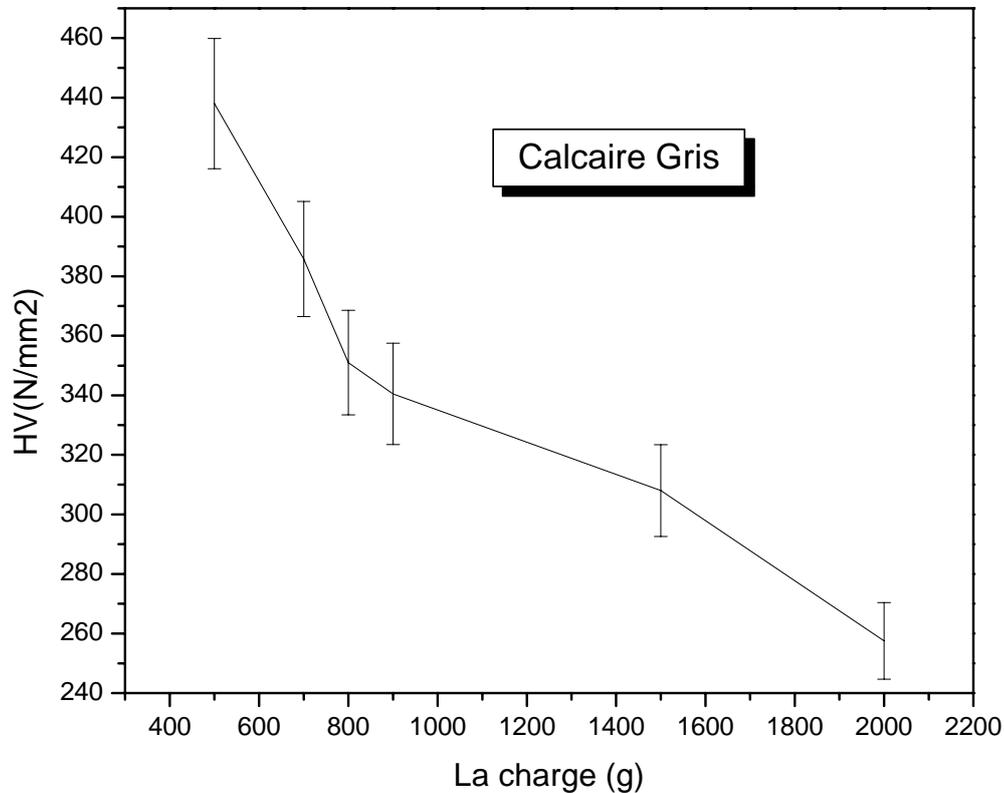


Figure 61 : Variation de la microdureté du calcaire gris.

V. ETUDE PAR MESURES MESURES DE POROSITE

La porosité est le rapport entre le volume des vides contenue dans l'échantillon de roche et le volume total de l'échantillon exprimé en pourcentage. Chaque roche est caractérisée par sa porosité, c'est -à-dire par la taille des interstices (appelée pores), entre les éléments solides de la roche. Ces pores interparticulaires sont des défauts d'agencement des roches à l'échelle du manomètre.

La porosité totale et les différentes densités peuvent être mesurées par la méthode de la pesée hydrostatique qui est fondée sur le principe de la poussée d'Archimède sur un échantillon.

Les mesures ont été faites sur des échantillons de roches de calcaire blanc et de calcaire gris, les résultats sont présentés dans le tableau 07. Les calcaires blancs et gris sont tous les deux des roches poreuses :

$$N_{tot} = \frac{M_{sat} - M_s}{M_{sat} - M_{hyd}}$$

où M_s : La masse de la roche à l'état sec.

M_{hyd} : La masse de la roche après imbibition sans eau de surface.

M_{sat} : La masse de la roche saturée en eau.

N_{tot} : La porosité totale en %.

σ : L'écart type.

	Roche calcaire blanc				Roche calcaire gris			
	1	2	3	4	1	2	3	4
Ms (g)	11,3547	11,3547	11,3547	11,3525	18,6326	18,6326	18,6296	18,6296
Msat (g)	11,4326	11,4442	11,4611	11,4261	18,7150	18,7322	18,7802	18,7155
Mhyd(g)	7,2386	7,2202	7,2961	7,1615	11,9360	11,8498	11,7322	11,8026
Porosité Ntot %	1,8574	2,1188	2,5546	1,7258	1,2155	1,4471	2,1367	1,2426
$\sigma = N_{Moy} - N_i$ %	0,2067	0,0546	0,4904	0,3383	0,2943	0,0627	0,6269	0,2672
Temps vide (heure)	1	1	1	1	1	1	1	1
Temps d'imbibition Eau distillée	1	2	19	1	1	2	19	1
Porosité Moyenne N	2,0641%				1,5098 %			

Tableau 7: Résultats de la porosité moyenne des essais sur le calcaire blanc et calcaire gris.

Le calcaire blanc et le calcaire gris sont toutes deux des pierres un peu poreuses, leurs porosités totales étant de **2,0641** % pour le calcaire blanc et **1,5098** % pour la pierre de calcaire gris.

Ces mesures déterminées par la méthode de la pesée hydrostatique qu'on nomme aussi la méthode d'Archimède, sont corroborées par d'autres méthodes de mesure de densité comme la porosimétrie au mercure ou la mesure de la masse et du volume d'échantillons découpés dans une forme géométrique simple pour la densité apparente ou le % d'humidité dans les roches.

- Dans une roche, la matière minérale forme un squelette solide qui ne remplit pas tout l'espace, et dont le complément, les vides, forme le réseau poreux (qu'il soit connecté ou non). La forme des vides, leur taille, leur répartition, leurs connectivités ou au contraire l'isolement de certains, influent sur le comportement mécanique du matériau. La masse volumique et la porosité renseignent sur les vides existants dans le matériau.
- De nombreuses études (Benavente 2004 ; Fitzner 2000) ont montré que la porosité constitue un facteur essentiel pour estimer la résistance d'un calcaire à la dégradation. La taille des pores et la morphologie du réseau poreux ont aussi une influence sur la cinétique de dégradation.
- Un fin réseau de micropores interconnectés facilite les transferts de fluides par capillarité et rend la roche plus sensible aux cristallisations des sels. La valeur de la porosité peut être extrêmement variable d'un calcaire à l'autre.
- Du point de vue qualitatif, il est important de faire une distinction entre porosité intragranulaire (vides dans les grains constitutifs) et porosité intergranulaire (vides entre les grains et au sein de la phase de liaison). Dans le cas du calcaire, les observations microscopiques montrent que le matériau comporte les deux types de porosité.
- Nous avons constaté que la plupart des vides intragranulaires sont constitués par les petits espaces laissés par les loges des organismes et microorganismes et par les dissolutions ayant affecté ces organismes. Les vides intergranulaires résultent des joints entre les grains et du manque de cimentation.
- Dans les calcaires, la porosité est très faible et ne joue presque pas dans la dégradation de la roche. En revanche, elle peut jouer dans la résistance de la roche et dans l'évolution de la dégradation si elle devient connectée

VI. ETUDE DE LA TENEUR EN EAU

La détermination de la teneur en eau se fait de façon très simple à partir d'échantillons de calcaire : après pesée, ils sont desséchés par étuvage à 105°C (selon la norme en vigueur) et repesés à la sortie. La différence de masse nous donne la teneur en eau à l'état actuel des échantillons (ni secs, ni saturés) c'est à dire à l'état d'échantillons laissés à température ambiante ce qui ne correspond pas à l'état naturel in situ. Nous définirons cet état comme l'état initial [9].

Le tableau 08 présente les résultats obtenus pour les deux calcaires étudiés. Ces teneurs en eau sont extrêmement faibles, voire non significatives. Nous pouvons alors en déduire qu'il n'y a quasiment pas d'eau liée dans les calcaires étudiés. Ainsi, dans le cas d'une élévation de température, l'eau qui interviendra sera uniquement celle du site et non pas l'eau structurale, avec :

$$\text{Teneur en H}_2\text{O} = \frac{\text{Mo} - \text{Md}}{\text{Mo}} \times 100$$

	Masse M ₀ (g)	Masse desséchée M _d (g)	Teneur en H ₂ O %	Moyenne %
Calcaire Blanc	12,7378	12,7318	0,0471	0,0438
	11,3518	11,3472	0,0405	
Calcaire Gris	16,8132	16,8018	0,0678	0,0456
	18,6289	18,6204	0,0456	

Tableau 08 : Teneur en eau des différents calcaires.

D'une manière globale le taux d'humidité reste faible dans les calcaires ce qui appui les résultats de la porosité des deux, cette dernière est aussi faible : 1,5% à 2%, ils sont donc considérés comme très peu poreux.

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de ce travail est d'étudier la caractérisation physico-chimique et physico-mécanique des géomatériaux à base de calcaire blanc et gris de djebel kellal et de l'argile du tunnel de djebel el ouahch.

Après un travail d'élaboration des échantillons sous forme de poudre ($< 80 \mu\text{m}$) pour les calcaires et l'argile, et de sucre sur des lames de verre pour en faire des lames minces que pour les calcaire, nous avons mis en oeuvre différentes techniques d'analyses pour mieux cerner leurs propriétés.

La diffraction des rayons X a permis d'identifier les phases existantes dans chaque échantillon : la calcite CaCO_3 , le quartz SiO_2 , la mullite ($3\text{Al}_2\text{O}_3, 2\text{SiO}_2$), Al_2O_3 , Fe_2O_3 et d'autres oxydes mineurs.

La microscopie optique a décelé dans les calcaires presque les mêmes phases qu'en diffraction X, et la présence aussi de fossiles dans ces calcaires prouvant que cette région était à des milliers d'années un milieu marin.

La microscope électronique à balayage, a mis en évidence dans les calcaires blancs, la pyrite sous ses trois formes cristallines : cubique, orthorhombique et rhomboïdale.

Les essais de microdureté Vickers montrent que sous la même charge, la dureté des calcaires gris est plus importante que celle des calcaires blancs.

Les tests de porosimétrie sur les deux types de roches, ont montrés que les calcaires blancs sont plus poreux que les calcaires gris. Notons que la valeur de porosité reste faible par rapport aux normes internationales sur les calcaires.

Le taux d'humidité très faible, nous permis de dire que les calcaires de Djebel Kellal sont de très bonne qualité puisqu'ils possèdent de bonnes propriétés mécaniques.

Néanmoins dans l'avenir, une étude approfondie du comportement thermique des calcaires et des argiles est souhaitable par :

- des analyses thermiques différentielles en DSC à hautes températures (vers les 1000°C et plus) ;
- des traitements thermiques à différentes températures des pastilles de la poudre fine, puis leurs observations au MEB permettra de suivre l'évolution morphologique et structurale et aussi les changements de phases, d'où la possibilité d'avoir une idée plus précise sur les propriétés physico-mécaniques de nos échantillons.

REFERENCES

- [1]- J. Deferne et N. Engel, Roche sédimentaire parité de livre « Le monde des roches » (2010).
- [2]- K. Hermans, Roche et minéraux, parité de livre « Le monde minéral », éd. Nathan Paris (1997).
- [3]- C. Deymier, Une nouvelle roche gemme de Birmanie: «La deymiérite », Nantes (2011).
- [4]- T. De Ruyver, J. Elson, « Classification des roches », Belgique (2005).
- [5] - W. A. Deer, R. A. Howie, J. Zussman, « An Introduction to the Rock-forming Minerals », London (1992).
- [6]- S. Gardin- BTSA gestion forestière, « Quelque élément de géologie », Paris (1996).
- [7]- V. Chopard, « Découverte de la géologie et l'hydrogéologie sur le site de derborence valérie chopard », Neuchâtel (2003).
- [8]- I. Soares, B. Vandroux, « Les pierres et bétons posés référentiel conception et gestion des espaces publics », France (2010).
- [9]- K. Besnard, DEA Hydrologie, Hydrogéologie, Géostatistique et Géochimie Filière Hydrologie et Hydrogéologie Quantitatives, « Evolution physico-chimique des matériaux carbonatés en milieu triphysique » Paris, (2000).
- [10]- J. Beauchamp, Sédimentologie, « Sédiments et roches sédimentaires », Paris (2005).
- [11]- N. Ibrahim, Thèse de doctorat, « Caractérisation des propriétés mécaniques des géomatériaux par technique de micro indentation », Lille (2008).
- [12]- P. Duffaut, F. Homand, Livre, « Manuel de mécanique des roches tom1 », France (2000).
- [13]- C. Plumelle, « B6 Chapitre1 (version 8/10/02) CNAM – Géotechnique », Paris (2002).
- [14]- M. Chalhob, F. Michel, « Massif roches homogénéisation et classification numérique » et « Les roches, les minéraux et l'érosion » Paris (2010).
- [15]- T. Maison, Thèse de doctorat, « Ecole centrale des arts et manufactures », Paris (2011).
- [16]- <http://> Initiation aux Sciences de la terre séance : géologie sédimentaire (2007).
- [17]- W. E. Warral, Elsevier, « Clay and ceramic raw materials », Amsterdam (1986).
- [18]- R. Boudchicha , Thèse de doctorat, « Etude de la cristallisation et des cristallisations et des propriétés mécaniques et diélectriques de céramiques de céramiques préparés à partir de Kaolin-Dolomite », Batna (2010).
- [19]- <http://> L1_S1_Lexique _de petrographie_fred _ lexique de pétrographie (2011).

- [20]- F. Ghonani, « généralité de science des matériaux de construction. Chapitre 1. Propriétés Générales des M.D.C (matériaux de construction) », Tlemcen (2008).
- [21]- J. Louis, Résumé du Stage de Géologie de Boulouris (Var) par Jean-Louis Roqueirol de Caminà, la rando pugétoise . des 6, 7 et 8 mai (2006).
- [22]- http://wikipedia.org/wiki/Projet:Roches,_fossiles,_gemmes_et_minéraux (2007).
- [23]- L. Jean-Paul, P. Gilles, G. Lhenry, la pierre matériau et production « Séminaire formes architecturaux et cultures constructive » (2000).
- [24]- W. Gherbi , Mémoire de Magistère, « Etude de la qualité des calcaires d'exploités : Cas de deux carrières d'agrégats de Ain Smara (environs de Constantine)"Cosider-Sonatiba" », Constantine (2006).
- [25]- E. Larive, Thèse de doctorat, « Etude expérimentale des roches à faible perméabilité par la mise en oeuvre d'un perméamétrie de précision », Montpellier (2002).
- [26]- <http://ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s2/ident.mineraux>, Roches et minéraux, collection Qui, Pourquoi, éd. Chantecler, Anvers (1973).
- [27]- A. Mohamed, Mémoire de Magister, « Exploitation des substances utiles à ciel ouvert et impact sur l'environnement ; Etude de cas dans l'Est Algérien (Les gisements de Djebel Salah, Région de Constantine) », Constantine (2008).
- [28]- C. Benabbas, O. Zeghdoud, S. Boumedous, « Particularités morpho-géologiques, néotectonique et instabilité des terrains en Algérie Orientale », Constantine (2007).
- [29]- L. Amel, Mémoire de magister, « Limites thermiques et adaptation de Pin Pignon dans la région de Constantine », Constantine (2008).
- [30]- F. Michel, S. El Zein, Sciences de la terre et découverte des métiers Matériaux de carrière et de construction, « Les Richesses des sous -sols », France (2006).
- [31]- M. Y. Bédard, B .Morteau, R. Gelvez-cloutier, S.leroueil, « Développements d'une chaîne de traitement pour l'atténuation des contaminants provenant des produits d'entretien de l'autoroute Félix-Leclerc, Rapport1 : Lit filtrant et marais épurateur adapté», Québec (2006).
- [32]- C. Hamina Makhloufi, Mémoire de Magister, « Influence de l'ajout pouzzolanique (Argile cuite) sur les caractéristiques physico- chimiques des ciments », M'Sila (2011).
- [33]- N. Elyakoubi, Thèse de doctorat, « Potentialités d'utilisation des argiles marocaines dans l'industrie céramique : cas des gisements de Jbel Kharrou et de Benhmed (Meseta marocaine occidentale) », Rabat (2006).

- [34]- O. Batrak, Thèse de doctorat, Toulouse (2005).
- [35]- http://Colleges.planete-tp.com/IMG/pdf/FR1b_la-roche_cle8f1e11_35 (2011).
- [36]- H. Sadok, Thèse de doctorat, « Le ciment Portland », Algérie (2011).
- [37]- B. Zouhir, Documents technique de l'office protection et de promotion de la vallée du mizab, Ghardaïa (2004).
- [38]- M. Kaabouche, B. Nesma, « La chaux et le stuc », Algérie (2004).
- [39]- C. Abdelmelek, B. Zouhir, Documents technique de l'office protection et de promotion de la vallée du mizab, « Guide chaux », Alger (2004).
- [40]- K. Beck. « Propriétés hydriques et vieillissement par cyclage imbibition-séchage de deux pierres calcaires à forte porosité », Vol. 11, France (2006).
- [41]- A. Rana, Thèse de doctorat, « Endommagement des monuments historiques en maçonnerie », Bordeaux (2009).

Physicochemical Characterization of geomaterials

Abstract :

The objective of this work is the physico-chemical and mechanical geomaterials limestone (white and gray) and clay. Two local raw materials are abundant. The first extraction is from the region of Jebel KELLAL and the second is from the region of Jebel Ouahch in province of Constantine.

After the samples preparation in powder form for limestone and clay, and sugar on glass slides, we have implemented various analytical techniques to better understand their properties: the X-ray diffraction, optical microscopy and scanning electron microscopy, the measurement of the microhardness, the measurement of the water porosity and measurement of moisture content.

The results of our work revealed that the white and gray limestone of Jebel KELLAL are very good qualities they possess important physico-chemical and mechanical. Therefore, they will be very useful in the construction and restoration.

Keywords: Geomaterials, limestone, clay, porosity, moisture.

دراسة الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمواد الصخرية

ملخص :

الهدف من هذا العمل هو دراسة الخصائص الفيزيائية، الكيميائية وكذلك الميكانيكية لمواد صخرية. لهذا الغرض اخترنا مادتي الكلس (الأبيض والرمادي) والطين . هاتان المادتان الأوليتان أصلهما محلي و متوفرة بكثرة : الأولى مأخوذة من منطقة جبل كلال و الثانية من جبل الوحش بولاية قسنطينة .

بعد عمل تحضير العينات في شكل مسحوق لكل من الكلس و الطين، وقطع السكر على الصفائح الزجاجية، قمنا باستعمال مختلف تقنيات التحليل من أجل التحديد الجيد لخصائصها : حيود الأشعة السينية، المجهر الضوئي، المجهر الماسح الإلكتروني، قياس الصلادة، قياس الفراغات بواسطة الماء وقياس نسبة الرطوبة .

النتائج المحصل عليها سمحت لنا باستنتاج أن الكلس الأبيض و الرمادي لجبل كلال ذو نوعية جيدة لأنه يتميز بخصائص فيزيائية – كيميائية و ميكانيكية عالية، و بالتالي يمكن استعماله في البناء و الترميم .

الكلمات المفتاحية: مواد صخرية، الكلس، الطين، الفراغات والرطوبة .

Résumé

L'objectif de ce travail est la caractérisation physico-chimique et mécanique de géomatériaux calcaire (blanc et gris) et argile. Deux matières premières d'origine locales très abondante. La première se trouve à dans la région de djebel kellal et la deuxième dans la région de djebel ouahch à wilaya de Constantine.

Après un travail d'élaboration des échantillons sous forme de poudre pour les calcaires et l'argile, et de sucre sur des lames de verre, nous avons mis en ouvre différentes techniques d'analyses pour mieux cerner leurs propriétés : la diffraction des rayons X, la microscopie optique et la microscopie électronique à balayage, la mesure de la microdureté, la mesure de la porosité à l'eau et la mesure du taux d'humidité.

Les résultats de nos travaux ont permis de constater que les calcaires blanc et gris de djebel kellal sont de très bonnes qualités puisqu'ils possèdent des propriétés physico-chimiques et mécaniques importantes. Par conséquent, ils seront très utiles dans la construction et la restauration.

Mots clés : Géomatériaux, calcaire, porosité, humidité, construction.