

UNIVERSITE CADI AYYAD
FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES
GUELIZ-MARRAKECH
DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE

Licence en Sciences et Techniques en Géologie Appliquée aux Ressources

Minières (LST GARM)

**Caractérisation et analyses microscopiques et géochimiques des
affleurements de la carrière M'zoudia, Jebel Ardouz,
Le Haouz occidental, Maroc**



Réalisé par:

- ARFA Yassine
- ASSOUKA Abdelaziz

Encadré par:

- Mr. H. IBOUH
- Mr. L. MOURCHID

Soutenu le 10 juin 2016 devant le jury :

Hassan IBOUH	Dép. Géologie, FSTG ; Univ.Cadi Ayya
Abdelkebir MOURCHID	Cadre, Ciment du Maroc, M'zoudia, Marrakech
Brahim IGMOULLAN	Dép. Géologie, FSTG ; Univ. CadiAyyad

Année Universitaire 2015-2016

RESUME

Dans le cadre de Projet de Fin d'Etude (PFE), on a effectué un stage au sien de la société CIMAR de Marrakech pendant un mois où on a traité un sujet intitulé **Caractérisation et analyses géochimiques et microscopiques des affleurements de la carrière M'zoudia, Jebel Ardouz, Le Haouz occidental, Maroc**. Dont le but est de caractériser les matières premières de la carrière M'zoudia, et d'estimer la consommation thermique au niveau du four à partir de la connaissance minéralogique de chaque matière.

Pour cela plusieurs techniques ont été utilisées telles que les analyses géochimiques par fluorescence X, la microscopie et le comptage de points. Afin d'arriver à faire des conclusions et sortir avec des perspectives

Dans cette étude, les matériaux carbonatés des carrières de Mzoudia et Ighoud ont été le siège d'une étude géologique abordé de trois manières complémentaires : cette étude à débiter par des observations sur le terrain pour une caractérisation macroscopique des matériaux géologiques. Dans cette partie un échantillonnage ciblé a été fait sur les différents faciès (schistes et carbonates).en suite Les deux autre approches ont été abordé simultanément. Ainsi une quinzaine d'échantillons ont été analysés par la méthode de fluorescence X, et une dizaine lames minces ont été confectionnées pour une analyse microscopique.

A la lumière des résultats obtenus par les études géochimiques et minéralogiques abordée par différentes techniques, nous pouvons conclure sur certains points et perspectives qui pourraient améliorer la qualité du ciment de l'usine CIMAR- Marrakech, par l'optimisation des matériaux de la carrière d'une part, et afin de diminuer la consommation thermiques au niveau du four tout en contrôlant la quantité des matériaux quartzitiques consommés d'autre part.

L'analyse microscopiques des lames et les résultats de la géochimie des calcaires et des schistes de la carrière de M'zoudia, a permet de mettre en évidence une variation aussi bien verticale que latérale des faciès à différents échelles. Cette variation est tantôt minéralogique tantôt chimiques. Pour répondre aux objectifs fixés au début de ce mémoire c'est dire la caractérisation de matériaux premiers du ciment au niveau de la carrière de M'zoudia, et de distinguer avec précision les zones potentielles de localisation des matériaux non nuisible et qui vont optimiser la qualité du ciment de l'usine CIMAR de Marrakech.

Remerciements

Ce modeste travail n'aurait pu avoir lieu sans la contribution de plusieurs personnes pour lesquelles nous tenons à exprimer nos profondes gratitude.

Nous ne saurions jamais comment exprimer nos profondes gratitude à Mr. H. IBOUH Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques Marrakech, qui a accepté notre encadrement, nous lui sommes très reconnaissants d'être toujours disponible malgré ses préoccupations nous le remercions de nous avoir appris beaucoup de choses, pour ses conseils précieux, ses directives et pour ses corrections pertinentes qu'il trouve ici le témoignage de notre profond respect.

Nos très profonds remerciements vont aussi à :

- Mr BOKIOUD, directeur de la société CIMAR qui nous a accordé ce stage.
- Mr MOURCHID, notre encadrant à la société qui a proposé le sujet, pour ses conseils et l'attention qu'il a porté sur la réalisation de ce travail.
- Mr HIAB, chef de service de carrière, pour leurs aides, leurs soutiens, et pour leurs encouragements et qui nous a bien suivi malgré ses multiples occupations.
- Mr ZIDANI, chef de secteur de carrière, pour les instructions sur le terrain.
- Mr KNIDRI, pour la confection des lames minces.
- Le personnel du laboratoire de CIMAR pour les analyses géochimiques.
- Tout le corps professoral de la FST de Marrakech.
- Tout le personnel de la société CIMAR Marrakech.

Table des matières

INTRODUCTION

CHAPITRE 1 :Généralités et présentation de la Société CIMAR données bibliographiques.....	8
1 : Généralité et présentation de l’entreprise CIMAR.....	9
1.1. Le Groupe Italcementi.....	9
1.2. CIMAR.....	9
1.3. CIMAR de Marrakech	10
1.4. Hiérarchie de la société.....	11
1.5. Les départements de l’entreprise	12
1.5.1. Département administratif.....	12
1.5.2. Département de production	12
1.5.3. Département de maintenance.....	12
2. Généralités sur le ciment	13
2.1. Définition.....	13
2.2. Composition du ciment	13
2.3. Gamme de fabrication.....	13
2.4. Le processus de production du ciment	14
2.4.1. Extraction des matières premières.....	16
2.4.1.1. Abattage.....	16
2.4.1.2. Forage et tir.....	16
2.4.1.3. Chargement et transport	16
2.4.2. Concassage.....	16
2.4.3. Préparation du cru	17
2.4.3.1. Pré-homogénéisation	17
2.4.4. Broyage cru	17
2.4.4.1. Broyeur vertical (broyeur à galet).....	17
2.4.4.2. Broyeur horizontal (broyeur à boulets)	17
2.4.5. Séparation.....	18
2.4.6. Homogénéisation.....	18
2.4.7. Cuisson	18
2.4.7.1. Clinkérisation.....	18
2.4.8. Refroidissement	18
2.4.9. Broyage de la matière cuite (broyage ciment)	19
2.4.10. Expédition	19

CHAPITRE 2 :ETUDES GEOLOGIQUE ET PETROGRAPHIQUE DE LACARRIEREM'ZOUDIA.....	20
1. Généralités sur le gisement de M'zoudia.....	21
1.1. Cadre géographique	21
1.2. Cadre géologique générale.....	21
1.2.1. Historique des travaux.....	22
1.3. Cadre stratigraphie.....	22
1.4. Cadre structural.....	25
1.5. Subdivision du gisement.....	25
1.5.1. Zones exploitables	26
1.5.2. Zones stériles	27
2. Caractérisation de la carrière de M'zoudia	28
2.1. Identification des matériaux premiers de la carrière M'zoudia.....	28
2.1.1. Reconnaissance macroscopique	28
2.1.2. Reconnaissance géochimique	32
2.2. Localisation des différents matériaux dans la carrière M'zoudia	33
CHAPITRE 3 :ETUDES GEOCHIMIQUES ET MINERALOGIQUES DES MATIERES PREMIERES DE LACARRIEREM'ZOUDIA.....	35
I. Méthodologie	36
1. Echantillonnage	36
2. Techniques d'analyse géochimique par fluorescenceX.....	40
2.1. Préparation des échantillons	40
2.1. Principe et appareillage	40
2.1.1. Avantages et limites.....	41
2.1.2. Précision et sensibilité	42
3. Les techniques d'étude minéralogique	42
3.1. Examen microscopique des lames minces.....	42
3.1.1. Préparation des lames minces.....	42
3.1.2. Examen de lames minces.....	45
II. RESULTATSETINTERPRETATIONS.....	46
1. Résultats obtenus.....	46
1.1. Résultats géochimiques	46
1.1.1. Paramètres chimiques utilisés	46
1.1.2. Calcul des paramètres	47
1.2. Résultats minéralogiques	48

1.2.1.	Descriptions des lames minces	48
1.2.2.	Calcul du taux de quartz dans les lames	52
2.	Interprétations	54
III.	Etude détaillée de des schistes inférieurs	56
1.	La diversification des schistes inférieurs(Zone5).....	56
1.1.	Echantillonnage.....	56
2.	Le Gradin n°1 de laZone5	56
2.1.	Etude géochimique des schistes	59
2.1.1.	Résultats.....	59
2.1.2.	Lecture et description	59
2.1.3.	Variation latérale du chimisme des schistes.....	60
2.1.4.	Interprétation.....	64
3.	Réalisation des sections verticales au niveau des formations exploitées.....	65
	Conclusion.....	68
	Perspectives	69
	REFERENCESBIBLIOGRAPHIQUES.....	70

Liste des Figures :

- Figure1:** filiales d'Italcementi Groupe dans le monde (documents internes de la société)
- Figure2:** les sites cimentiers de CIMAR au Maroc (documents internes dela-société)
- Figure3:** Organigramme de la société (documents internes de la société)
- Figure4:** Procédé de fabrication de ciment (documents internes de la société)
- Figure5:** Localisation géographique de l'usine CIMAR Marrakech
- Figure6:** Schéma de corrélation stratigraphique du gisement de M'zoudia (D'aprèsVivier1974et Tahiri 1982 ; données descriptives que nous avons traduit en schéma)
- Figure7:** Coupe schématique de la carrière de M'zoudia (Documents internes de- la société cimarr)
- Figure8:** Subdivision du gisement de M'zoudia (documents internes de la société)
- Figure9:** Photo montrant un échantillon de d'un calcaire pur de la carrière M'zoudia
- Figure10:** Photo montrant un échantillon de calcaire magnésien (dolomitique) de la carrière M'zoudia
- Figure11:** Photo montrant un échantillon de calcaire marneux de la carrière M'zoudia
- Figure12:** Photo montrant un échantillon de schiste noir de la carrière M'zoudia
- Figure13:** Photo montrant un échantillon de schiste rouge de la carrière M'zoudia
- Figure14:** Photo montrant un échantillon marne de la carrière de M'zoudia
- Figure15:** Localisations des différents matériaux dans la carrière M'zoudia
- Figure16:** Carte représentative des prélèvements effectués dans les différentes
- Figure17:** Schéma de spectromètre à dispersion de longueur d'onde
- Figure18:** Appareillage de compteur des points
- Figure19:** Projection des résultats de taux de quartz sur la carte des prélèvements
- Figure20:** Carte représentative de localisation des échantillons prélevés
- Figure21:** La composition chimique en éléments majeurs des schistes

- Figure22:** Les profils E-W établie en fonction des prélèvements
Figure23: Photo d'exécutions des Forages au niveau des formations exploitées
Figure24: Coupe verticale de refus pyramidique (cutting)
Figure25: Schéma de la section verticale d'un gradin et la superposition inverse au niveau du cutting
 (Pyramide des produits du forage)

Liste des Planches

Planche 1 : photos d'Appareillages de la « fluorescenceX ».....	40
Planche 2 : photos d'appareillages de fabrication des lames minces (pris au laboratoire des lames mince de la FSTG)	44
Planche 3 : photos d'observation des lames mince (Grossissement*100).....	51
Planche 3 : photos d'observation des lames mince (Grossissement*100).....	52
Planche 4 : Aspect macroscopique des schistes inférieurs sur le gradin 1 de lazone5.....	58

Liste des Tableaux

Tableau 1 : limites des compositions chimiques propres pour le clinker (doc de la société).....	14
Tableau 2 : Terminologie des roches sédimentaires du pôle calcaire au pôle argile.	30
Tableau 3 : la composition chimiques des matériaux premiers de la carrière de M'zoudia (établie à partir des documents de la société).....	33
Tableau 4 : Représentation des donnés pour les échantillons prélevés.....	39
Tableau 5 : Composition chimique (% en oxydes) des différents matériaux.....	46
Tableau 6 : Représentation des paramètres calculés pour chaque échantillon.....	47
Tableau 7 : Résultats minéralogiques synthétiques	53
Tableau 8 : composition chimique des différents schistes du gradin 1 –zone5	59

INTRODUCTION

Plusieurs travaux de géologie ont été réalisés dans la région M'zoudia (Vivier 1974, Tahiri, 1982 ; et d'autres...). Ils ont qualifié la région comme étant riche en calcaire et pour toutes cimenteries dans le monde, le calcaire et l'argile constituant la matière première de base dans la fabrication du ciment.

La société CIMAR de Marrakech fut installée au niveau de cette région pour profiter de ses ressources en calcaire. Et pour assurer la production permanente de l'usine, il faut bien diriger l'exploration ainsi que l'exploitation du gisement de M'zoudia qui alimente en matières premières nécessaires pour la fabrication du ciment. Récemment l'usine s'alimente en calcaire pur qui provient d'un autre gisement (ou carrière d'Ighoud) loin de l'usine de 75 Km, Malgré la distance l'approvisionnement se fait pour deux raisons : la première est de profiter des calcaires purs et donc de faire des mélanges on utilise le maximum de matière première de la carrière M'zoudia (schiste, marne,...); la deuxième est de prolonger la durée de vie du gisement M'zoudia en diminuant la quantité d'extraction en les compensant par les apports qui viennent d'Ighoud.

Le ciment est considéré jusqu'aujourd'hui comme le premier élément de base de toute construction et le gain d'énergie lors de sa fabrication a toujours constitué un défi majeur pour réduire son prix de revient.

Notre stage effectué au sein de CIMAR de Marrakech dans le cadre de projet de fin d'étude, Licence GARM, s'articule autour de deux grands axes :

- Caractérisation géologique de la carrière M'zoudia en définissant les différents matériaux premiers utilisables pour les fabrications cimentaires.
- Etude géochimique et minéralogique des matériaux, en déterminant les composants chimiques et minéralogiques de cette matière première.

Nos objectifs sont:

- La caractérisation des matières premières de la carrière M'zoudia.
- Estimation de la consommation thermique au niveau du four à partir de la connaissance minéralogique de chaque matière.

Finalement, c'est une occasion pour appliquer quelques notions théoriques acquises lors de notre formation universitaire.

CHAPITRE 1 :

Généralités et présentation de la Société CIMAR données bibliographiques

1 : Généralité et présentation de l'entreprise CIMAR

1.1. Le Groupe Italcementi

Un des premiers acteurs mondiaux dans les matériaux de construction, Italcementi groupe est né du rapprochement de deux sociétés dont l'expérience cimentière remonte à plus d'un siècle : Italcementi, fondé en 1864, et ciments français en 1881.

Italcementi Groupe est aujourd'hui présent dans 19 pays à travers le monde (Fig. 1) incluent Belgique, France, Italie, Maroc, Espagne, Turquie, Canada, USA et Grèce, avec les récentes acquisitions en Bulgarie, Kazakhstan, Thaïlande, Inde et Egypte. Le groupe emploie plus de 17800 personnes et exerce son activité dans trois métiers de proximité. Le dispositif du groupe compte plus de 60 cimenteries, 547 centrales à béton et près de 154 carrières de granulats.

Le savoir faire et les compétences spécifiques du groupe sont concentrés dans le centre technique du groupe où les chercheurs et les techniciens apportent aux filiales une assistance technique dans divers domaines et étudient de nouveaux matériaux à base de ciment.



Figure1: filiales d'Italcementi Groupe dans le monde (documents internes de la-société)

1.2. CIMAR:

La société Ciment du Maroc (CIMAR) est une filiale de Italcementi Groupe, ce dernier présente au Maroc, dans trois sites (usine de Safi, d'Agadir et celle de Marrakech), contrôlée à 64% par Italcementi Group, leader européen du ciment (Fig. 2). Le groupe est classé 6ème des cimenteries au monde et contrôle une cinquantaine d'Usine dans différents pays.

Avec un capital de 797.569 .200 Dhs, Ciment du Maroc est numéro 2 de l'industrie cimentière au Maroc, il produit et commercialise actuellement 2,5 millions tonnes de ciment par an, dont 410 .000 tonnes destinées à l'export, avec une capacité de production de 3 millions tonnes par an.

CIMAR exerce son activité dans le domaine de matériaux de construction à travers les cimenteries d'Agadir, Safi, et Marrakech pour la production du ciment.

- La société BETOMAR pour la production du béton prêt à l'emploi.
- La société SAGRAM pour la production du granulat et plusieurs centrales et carrières à travers le Royaume (Voir fig.2).



Figure2: les sites cimentiers de CIMAR au Maroc (documents internes de la-société)

1.3. CIMAR de Marrakech:

ASMAR a été créée à l'initiative des pouvoirs publics de la SNI et de trois sociétés affiliées LAFARGE, CADEM (productrice du ciment) et SNCE (utilisatrice du ciment).

Dès la fin de l'année 1972, les travaux d'inventaire d'indices ont commencé dans la région de Marrakech, ils ont conduit au choix du site de M'zoudia situé à 46 km de Marrakech en raison de sa faible teneur en magnésium et à cause de la facilité d'accès.

L'usine a été créée le 15 décembre 1972 et a débuté ces activités en 1976. Elle se situe au centre du Maroc à environ 47 km à l'ouest de la ville de Marrakech, sur la route nationale n° 10 en direction d'Essaouira dans le petit village de M'zoudia.

L'usine dispose d'une carrière avec des réserves en mesure d'alimenter l'usine pour une période de plus de 40 ans avec une cadence annuelle de production qui dépasse 1.000.000 tonnes.

1.4. Hiérarchie de la société

Ciment du Maroc se compose de 3 départements (Figure 3), chaque département de la société est subdivisé en plusieurs services ayant chacun des responsabilités bien définies.

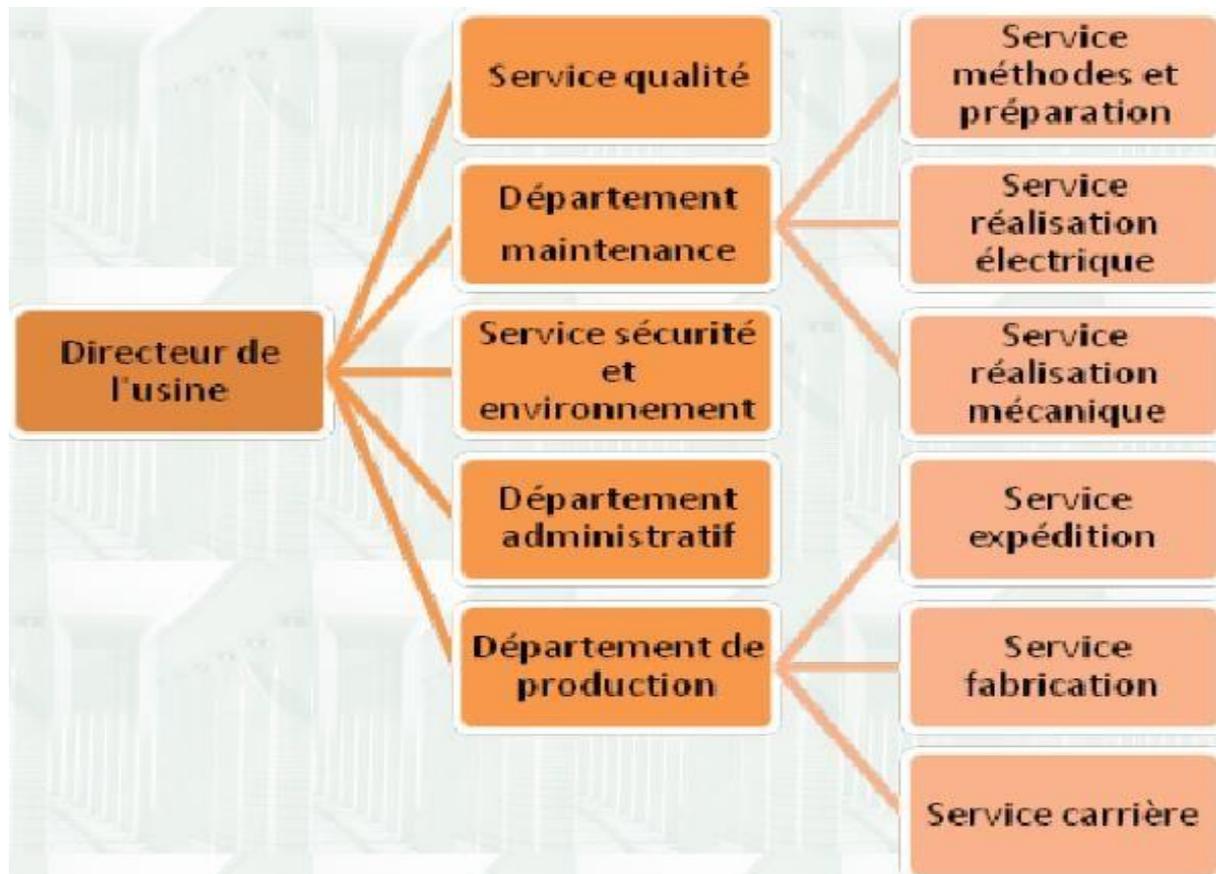


Figure3: Organigramme de la société (documents internes de la société)

1.5. Les départements de l'entreprise:

1.5.1. Département administratif

Il s'occupe de personnel, de la comptabilité, du contrôle de gestion, du commerce et du service social.

- **Service personnel** : Le rôle de service est l'occupation des employées, de leurs paies, des salaires de congés.....etc.
- **Service contrôle de gestion** : Etablit des budgets pour chaque exercice, ensuite il compare les prévisions aux réalisations afin de déterminer les analyses.
- **Service social** : Il est responsable de la cantine, du moyen de transport du personnel de la société et du service médical.
- **Service commercial** : c'est un service de marketing, il est composé d'un certain nombre d'agent commerciaux qui restent en contact avec les clients.

1.5.2. Département de production

Le département de production constitue le cœur battant de l'Usine, ce département comporte 3 services qui sont:

- **Service carrière** : Alimentation de l'usine en matière première. Il dispose de 2 Carrières : La Carrière M'zoudia et celui d'Ighoud.
- **Service fabrication** : Contrôle et suivi du bon fonctionnement du processus de fabrication de ciment.
- **Service expédition** : assure la livraison de produit fini en sacs ou en vrac.

1.5.3. Département de maintenance:

C'est le département vital de l'usine, il assure des travaux de maintenance et de préparation des travaux d'intervention ainsi que leur réalisation à travers 3 services :

- **Service méthodes et préparation** : assure l'élaboration et la planification des travaux de la maintenance d'entretien à court, moyen et long terme.
- **Service réalisation électrique** : réalisation des travaux d'entretien électriques et de la réparation des anomalies et panne type électrique
- **Service réalisation mécanique** : assure la réalisation des travaux d'entretien mécanique planifiés par le service méthode.

2. Généralités sur le ciment

2.1. Définition:

Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous la forme d'une poudre fine s'hydratant en présence d'eau. Il forme une pâte faisant prise qui durcit progressivement à l'air ou dans l'eau. C'est le constituant fondamental du béton puisqu'il permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide.

2.2. Composition du ciment:

Le ciment est formé essentiellement de clinker et des autres matières d'additions ajoutées au niveau du broyage, celles-ci diffèrent d'une usine à une autre. Dans l'usine de Marrakech ces matières sont : le gypse, le calcaire, la pouzzolane naturelle, les schistes calcinés et les cendres volantes.

2.3. Gamme de fabrication:

L'usine CIMAR de Marrakech produit trois types de ciments : CPJ35, CPJ45 et CPJ55. Le tableau 1 présente la composition de chaque type de ciment, ainsi que son utilisation :

Nom	Catégorie	Composition	Utilisation
Ciment portland composé 35	CPJ35	Clinker : +65% Matière ajoutée : 35% (calcaire, pouzzolane, cendres volantes, gypse)	Les bétons armés faiblement sollicités et tous les travaux de maçonnerie.
Ciment portland composé 45	CPJ45	Clinker : +70% Matière ajoutée : 30% (calcaire, pouzzolane, cendres volantes, gypse)	Ciment du premier choix, utilisé pour la réalisation des travaux en béton armé en bâtiment et les travaux de grande masse.
Ciment portland composé 55	CPJ55	Clinker : +85% Matière ajoutée : 35% (calcaire, pouzzolane, cendres volantes, gypse)	Ouvrages en béton armé fortement sollicité, préfabrication et béton manufacturé, béton précontraint.

Tableau1: composition et utilisation des ciments (documents internes de la société)

2.4. Le processus de production du ciment:

Plusieurs voies de fabrication du ciment existent, notamment la voie humide, voie semi humide et la voie sèche. Cette dernière qui est utilisée à la première fois à l'usine de Marrakech, et réside dans l'économie importante de l'énergie, surtout pour un pays importateur de combustible. Les matières premières employées en cimenterie sont extraites de carrières des calcaires et d'argiles. Ces carrières apportent les quatre constituants fondamentaux qui participent au processus de transformation du mélange cru en clinker. Les premiers apportent les carbonates de calcium CaCO_3 , et les secondes contiennent les oxydes : silice SiO_2 , alumine Al_2O_3 , Oxyde de fer Fe_2O_3 . Donc les matières premières de base doivent contenir quatre oxydes indispensable à la fabrication du clinker : la chaux CaO , la silice SiO_2 , l'alumine Al_2O_3 , et l'oxyde de fer Fe_2O_3 .

Il faut donc élaborer des mélanges des matières de base : calcaire et argile, de façon à obtenir la composition chimique voulue. Le tableau 2 présente les limites des compositions chimiques propres pour la fabrication de clinker :

Oxydes	Teneurs limites en pourcentage (%)
CaO	40-44
SiO₂	13-16
Al₂O₃	3-6
Fe₂O₃	2-5

Tableau 2 : limites des compositions chimiques propres pour le clinker (document interne de la société)

Il est très nécessaire d'affiner cette composition par l'ajout d'autres produits correctifs :

- ❖ *les cendres de pyrite* : apport de Fe_2O_3 .
- ❖ *Sable* : apport de silice SiO_2 .
- ❖ *Bauxite*: apport d'alumine Al_2O_3 .
- ❖ *Calcaire pur* : apport de chaux (CaO).

On note que la fabrication du ciment est un procédé complexe qui exige un savoir-faire, une maîtrise des outils et des techniques de production, de contrôle rigoureux et continu de la qualité. Ce procédé comporte les étapes suivantes (Fig. 4):

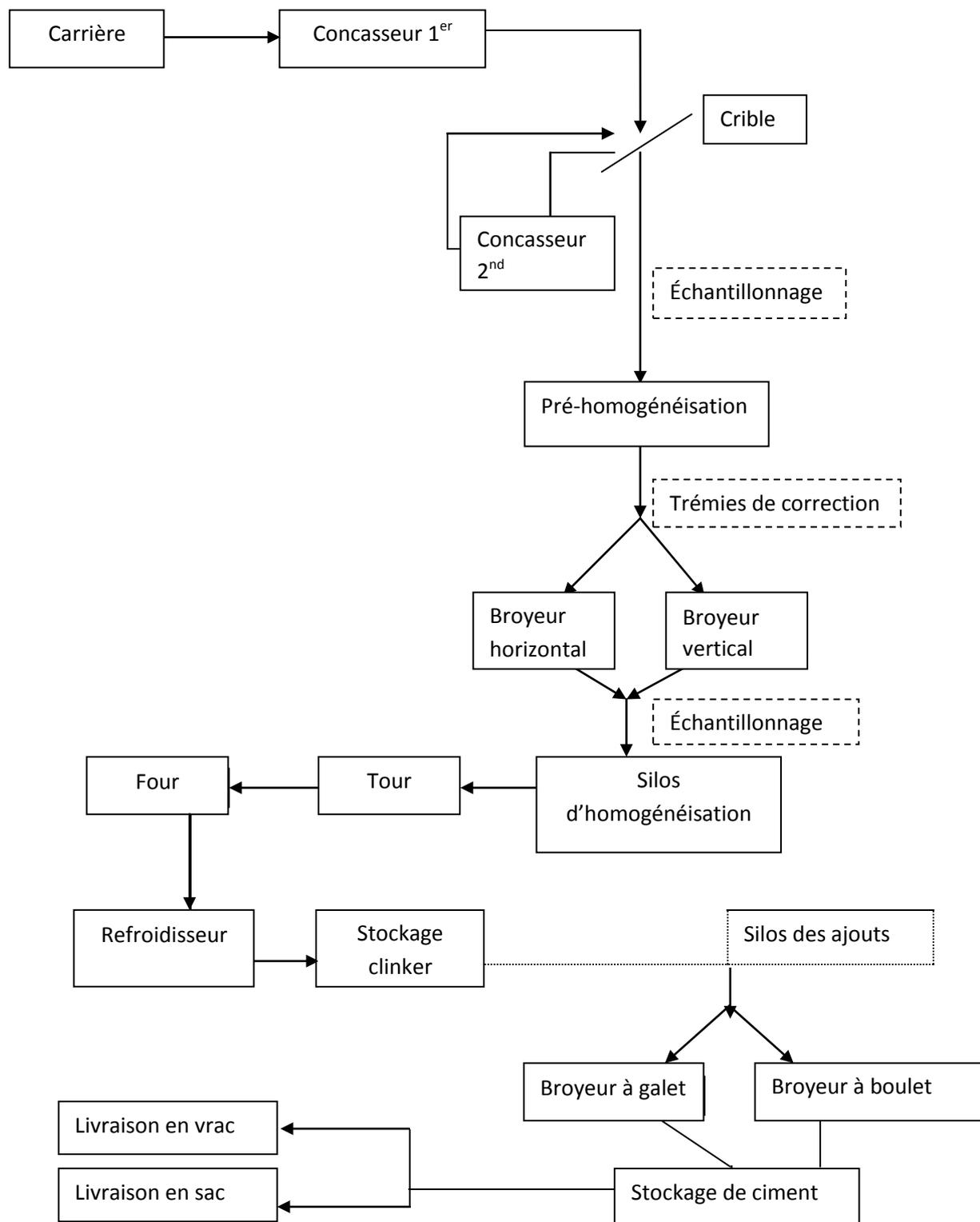


Figure4: Procédé de fabrication de ciment (documents internes de la société)

2.4.1. Extraction des matières premières:

Les carrières sont des vastes terrains dont on exploite des matières premières vierges, les réserves peuvent couvrir les besoins pour plusieurs décennies, dans le cas M'zoudia, elles sont estimées à plus de 40 ans. Dans ce sens CIMAR dispose de 2 carrières:

- **Carrière de M'zoudia**: carrière principale située juste à coté de l'usine, riche en calcaire et en schistes.
- **Carrière d'Ighoud**: située à 70 km de l'usine, constituée principalement de calcaire pur.

Pour produire des ciments standards de qualité constante, les matières premières doivent être très soigneusement échantillonnées, dosées et mélangées de façon à obtenir une composition parfaite et désirable. On note que l'extraction se déroule selon une succession de processus :

2.4.1.1. Abattage:

L'abattage à l'explosif est le moyen la plus répandue particulièrement pour les roches les plus dures. Cette méthode consiste à fragmenter le massif exploité à l'aide d'explosif afin que le matériau soit repris aisément par des engins et acheminé à l'usine. Lorsque les explosifs ne sont pas nécessaires ou ne sont pas utilisables, comme c'est le cas des roches friables et tendres (schistes), on fait appel à des engins mécaniques lourds.

2.4.1.2. Forage et tir:

On fait la préparation des gradins par le nettoyage, ensuite on effectue le forage des trous de mines par une machine foreuse à chenilles. Le chargement de trous de mines se fait au moyen de deux types d'explosif qui sont l'AMMONIX et SIGMA, le premier en vrac et le deuxième en cartouches, tel que premièrement on charge les trous par les cartouches ce qui est équivalent de 3 kg de gel, puis on continue la charge par l'AMMONIX de 26 à 27 kg par trou, en laissant à la fin du trou 1,80 m pour le bourrage. Pour amorcer l'explosif, on utilise les détonateurs électriques instantanés et à microretard, les premiers pour l'amorçage des blocs et des mines de base, et le deuxième pour l'amorçage du grand tir, avec un mode d'amorçage fond du trou. A la fin de chargement des trous on branche les fils électriques dans un explodeur distancé de 300 m du lieu de tir.

2.4.1.3. Chargement et transport:

Après l'abattage de la matière première, le transport se fait par des camions d'une capacité de 40 tonnes chargés à l'aide des chargeurs de 5 m³ de godet, ces camions transportent la matière première au concasseur de type giratoire afin de réduire les blocs de plus de 1 m³ à une granulométrie de 150mm³.

2.4.2. Concassage:

Les matériaux extraits de carrières, subissent une opération de concassage où leurs tailles sont réduites à environ 40 mm au maximum. Cette opération passe par un concasseur principal B de type giratoire entraîné par un moteur électrique et muni d'une trémie de réception.

La matière passe par un crible, qui sélectionne les grains ayant le diamètre est supérieur à 40 mm pour le recycler en les passants par deux concasseurs secondaires : L et M qui ont le même rôle que le principal.

2.4.3. Préparation du cru:

Au cours de préparation du cru, on réalise le mélange homogène du calcaire et de l'argile dans des proportions définies en fonction de leurs compositions chimiques particulières, mais toujours proche du rapport : 80% de calcaire pour 20% d'argile. Un appareil mécanique (le manège) permet de construire un tas polaire constitué de couches superposées les unes sur les autres et qui seront reprises après, selon un plan perpendiculaire permettant ainsi de prélever de toutes les couches.

2.4.3.1. Pré-homogénéisation:

Après concassage, la matière crue présente toujours des fluctuations importante dans sa composition, c'est pourquoi elle est stockée dans l'installation de pré-homogénéisation. La matière concassée est acheminée par des bandes transporteuses vers le manège, celui-ci est muni de deux bandes qui peuvent effectuer des mouvements de translation diamétralement formant ainsi un tas sous forme de pyramide. Le transport du tas formé vers la trémie en bas du manège s'effectue par un système mécanique qui s'appelle Scraper, ce dernier est muni d'une chaîne à raclette et des herse qui aident à reprendre verticalement les couches du tas de façon à avoir des proportions homogènes.

2.4.4. Broyage cru:

Les matières préparées par le concassage et la pré-homogénéisation doivent être maintenant réduites à la finesse requise pour la cuisson. Deux types de broyeurs adoptés à la cimenterie:

2.4.4.1. Broyeur vertical (broyeur à galet):

C'est le plus utilisable, il est constitué de deux paires de galets à suspension flottante entraînés sur un plateau de broyage. La matière à broyer est déversée ensuite sur le plateau. Sous l'effet de la force centrifuge, la matière passe sous les galets, et le produit évacué par-dessus le bord extérieur du plateau où il est repris par le flux d'air de transport venant d'un anneau de soufflage concentrique au plateau.

2.4.4.2. Broyeur horizontal (broyeur à boulets):

La matière traverse un cylindre tournant autour d'un axe horizontal. Entraînés par la rotation du broyeur, des boulets servant de corps broyant, écrasant de plus en plus finement la matière. Le tube broyeur est devisé en deux chambres de séchage et de broyage. Dans la chambre de séchage, des releveurs favorisent le mélange de la matière et des gaz de séchage.

Dans la chambre de broyage les boulets sont répartis le long du cylindre en fonction de leur poids et de leur diamètre.

A la fin de processus de broyage, la matière quitte le broyeur, elle est dirigée vers un séparateur qui sélectionne les particules suivants leurs grosseur. Les fines sont dirigées vers les silos d'homogénéisation, tandis que les particules insuffisamment broyées sont recyclées sur le broyeur.

2.4.5. Séparation:

L'objectif est de séparer les grosses particules de la farine et les recyclées vers la chambre de broyage. Cette opération est faite par un turbo-séparateur qui est équipé dans sa partie supérieure d'un ventilateur qui génère le mouvement de l'air chargé en matière dans la chambre de séparation, le principe de fonctionnement repose sur la combinaison de la gravité et des forces d'écoulement.

2.4.6. Homogénéisation:

A la sortie de broyage, après séparation, une ultime étape va conférer à la matière crue une composition chimique quasi-stable, c'est le but d'homogénéisation. La farine, introduite en continu au sommet du silo, se dépose en couche superposées. L'homogénéisation est réalisée par fluidisation de la matière qui est mise en mouvement vertical et est intimement mélangée avant de retomber sur le fond d'où elle est extraite puis évacuée vers les cyclones de la tour.

2.4.7. Cuisson:

Réalisée dans un four rotatif, à une température comprise entre 1400 et 1500 C, la cuisson permet la transformation du cru en clinker. Le cycle du traitement comporte les phases suivantes:

- * Le préchauffage qui s'effectue dans un échangeur de chaleur situé à l'amont du four, les gaz chauds provenant du four y brassant la farine à contre-courant.

- * La décomposition des argiles qui se situe au dessus de 500°C.

- * La décarbonatation des calcaires qui s'effectue à environ 950°C dan la partie avant four dont des températures sont comprises entre 550 et 1000°C, elle est achevée à l'entrée de four.

- * La formation du clinker (clinkérisation) à 1450°C qui s'effectue en partie aval du four près du brûleur

2.4.7.1. Clinkérisation :

A la sortie du préchauffeur la farine arrive dans le four rotatif où s'effectue l'étape la plus importante de sa transformation. Le processus de la clinkérisation est comme suit :

A l'entrée du four la décarbonatation de la farine se poursuit et s'achève. Au fur et à mesure que la farine avance sous l'effet rotatif, et grâce à l'inclinaison du four, sa température augmente, ce qui permet la formation des minéraux du clinker à partir de 1250°C environ 1450 à 1500°C. Au cours de cette étape, la chaux provenant du calcaire se combine à la silice, l'alumine, et l'oxyde de fer pour former les minéraux de clinker. Entre la zone de clinkérisation et la sortie du four, le clinker subit un pré-refroidissement. C'est la zone de trempe.

2.4.8. Refroidissement:

Cette opération a pour but d'abaisser la température du clinker qui est de l'ordre de 1200 à 1400°C à la sortie de four. Elle a également une incidence sur la qualité du ciment. Un refroidissement trop lent peut amener la libération de chaux libre et la transformation du C3S en C2S qui entraîne une baisse de résistance.

2.4.9. Broyage de la matière cuite (broyage ciment):

Il est réalisé en continu dans des broyeurs alimentés à partir des stocks de clinker et des différents constituants et ajouts. Le broyage a pour objectif, d'une part de réduire les granules de clinker en poudre, d'autre part de procéder à l'ajout de gypse (dont le but de régulariser le phénomène de prise). Ainsi qu'à celui des éventuels autres constituants (calcaire, pouzzolane, cendre volante...).

Ce qui permet d'obtenir les différents types de ciments normalisés.

2.4.10. Expédition:

A la sortie du broyeur, le ciment est transporté vers les silos de stockage, pour être soit ensaché soit expédié en vrac suivant la demande du client.

- ❖ **Livraison en vrac (a)** : les véhicules à citerne sont placés sur un pont bascule sous une tête de chargement télescopique est adaptée à l'ouverture de la citerne et un système de commande contrôle le chargement. Il existe un poste de livraison.
- ❖ **Livraison en sac (b)** : des sacs de poids net égale à 50 Kg sont mis vides dans des ensacheuses permettant leur remplissage par le ciment. Les sacs sont placés par des ouvriers. Il existe trois machines ensacheuses commandant six lignes de livraison en sac.



Livraison en vrac(a)



Livraison en sac(b)

CHAPITRE 2 :

ETUDES GEOLOGIQUE ET PETROGRAPHIQUE DE LA CARRIERE M'ZOUDIA

1. Généralités sur le gisement de M'zoudia

1.1. Cadre géographique

Le gisement de M'ZOULDIA ou unité du jbel ardouz, est situé près de l'usine c'est à dire à 47km à l'Ouest de Marrakech sur la route principale reliant Marrakech à Essaouira. Ce jbel qui fait parti du domaine sud des jebilet occidentales culmine à 455m, ce qui représente une dénivellation de 75m au dessus de la plaine du Haouz (Fig. 5).



Figure5: Localisation géographique de l'usine CIMAR Marrakech

1.2. Cadre géologique générale

Le gisement de M'zoudia correspond à la structure géologique de Jbel Ardouz formant la partie sud de la boutonnière hercynienne des Jbilet occidentales ; il constitue un synforme orienté, approximativement N-S avec une amplitude de 200 m.

1.2.1. Historique des travaux:

Les études dans la région de M'zoudia ont débutées en 1972 par Bouhaouli, Desthieux et Nataf à la recherche des matières premières minérales qui justifieraient l'implantation d'une cimenterie. Ces études effectuées à la base d'un échantillonnage très limité ont qualifié le gisement de dolomitique.

En 1974, la société LAFARGE réalisa une étude détaillée du gisement en exécutant une quarantaine de sondages et une cimenterie fut implantée.

En 1982, Tahiri, dans le cadre d'une étude géologique de la partie Sud des jebilet occidentales, a subdivisé cette région en trois domaines :

- un domaine autochtone
- un domaine para-autochtone
- un domaine allochtone

L'autochtone est constitué de terrains puissants (9000m) non métamorphiques dans la partie orientale. Les formations sont essentiellement calcaires à la base et silto-gréseuses au sommet.

Le para-autochtone est constitué d'une nappe dont les formations calcaro-péllitiques.

L'allochtone comporte trois unités structurales attribuées au Paléozoïque:

- L'unité de jbel Ardouz est constituée de terrains dévoniens non métamorphiques.
- L'unité des Skhirat est constituée de terrains de nature lithologique variée. On y rencontre des roches détritiques.
- L'unité d'Abda est constituée d'un matériel volcano-sédimentaire.

1.3. Cadre stratigraphie:

Plusieurs hypothèses ont été proposées pour établir la stratigraphie du gisement de M'zoudia, en particulier Vivier (1974) et Tahiri (1982) (Fig. 6). Vivier se basant sur les analyses chimiques et sur des sondages, a proposé la succession stratigraphique de bas en haut, suivante:

- Schistes inférieurs : épaisseur inconnue
- Calcaire et calcaire dolomitique : épaisseur variable (60 à100m)
- Schistes supérieurs : épaisseur100m

- Quartzites : épaisseur non déterminée

Puis un ensemble discordant formé:

- Des marnes (calcaire argileux, schistes) : épaisseur 15 à 40m
- Encroûtement calcaire (conglomérat) : épaisseur 8m.

Tahiri se base sur une étude géologique de terrain et propose la succession paléozoïque suivante :

- une formation argilo gréseuse et conglomératique rouge et des quartzites.
- une formation calcaire comprenant des dolomies, des calcaires et des marno-calcaires.
- une formation grés-quartzitique.

Le schéma ci-dessous (fig 6) présente la corrélation stratigraphique entre les deux différentes successions:

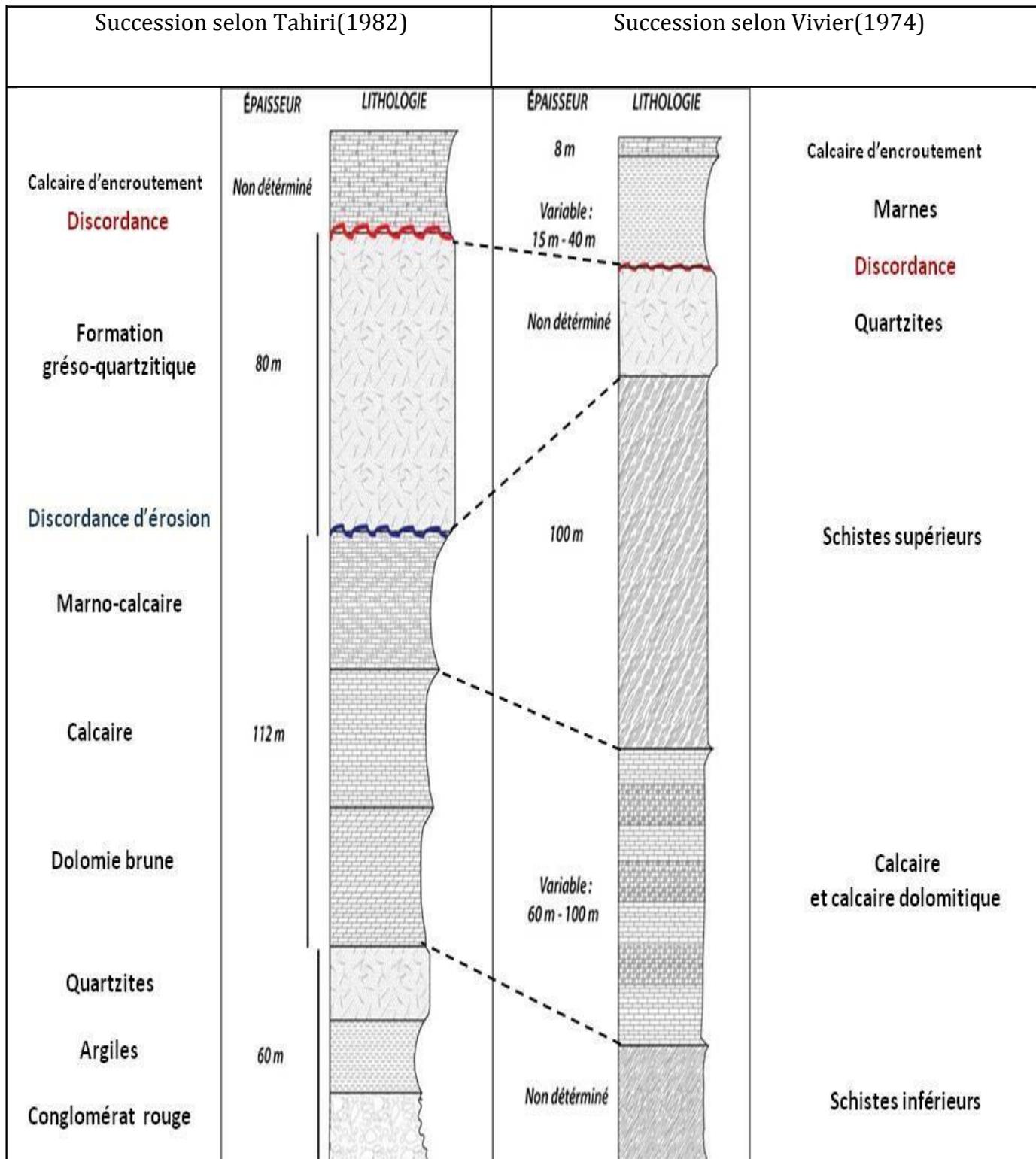


Figure6: Schéma de corrélation stratigraphique du gisement de M'zoudia (D'après Vivier 1974 et Tahiri 1982 ; données descriptives que nous avons traduit en schéma)

1.4. Cadre structural:

D'après Tahiri (1982), le jbel Ardouz est un synforme nord-sud en forme de cuillère. La structure du gisement est complexe à cause de nombreux contacts anormaux liés à des chevauchements. Les couches sont pentées d'environ 30° à 60° vers le Sud Est (le pondage des couches changent d'une zone à l'autre), les calcaires d'encroûtement reposent en discordances sur ces dernières. On note une série de failles verticales visibles de direction E-W. Ces dernières divisent le flanc Ouest du synforme en 9 compartiments, qui constituent chacun une zone d'exploitation (Fig.7).

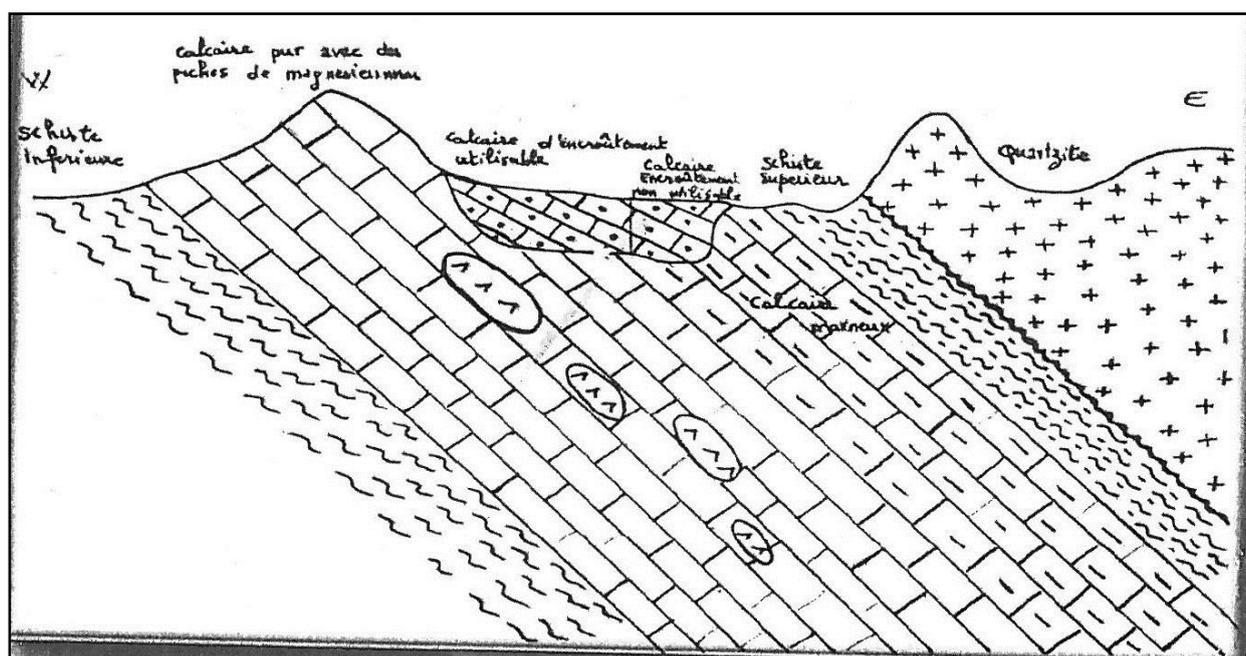


Figure7: Coupe schématique de la carrière de M'zoudia (Documents internes de- la société cimmar)

1.5. Subdivision du gisement:

La carrière de M'zoudia est subdivisée en 9 zones dont les limites correspondent à des failles majeures de direction E-W. La structure détaillée du gisement est complexe à cause de la présence de nombreux contacts anormaux liés à des chevauchements qui recoupent toute la série particulièrement à la base et auxquels sont liés des plis. Ces contacts anormaux sont visibles sur le terrain (Fig.8).

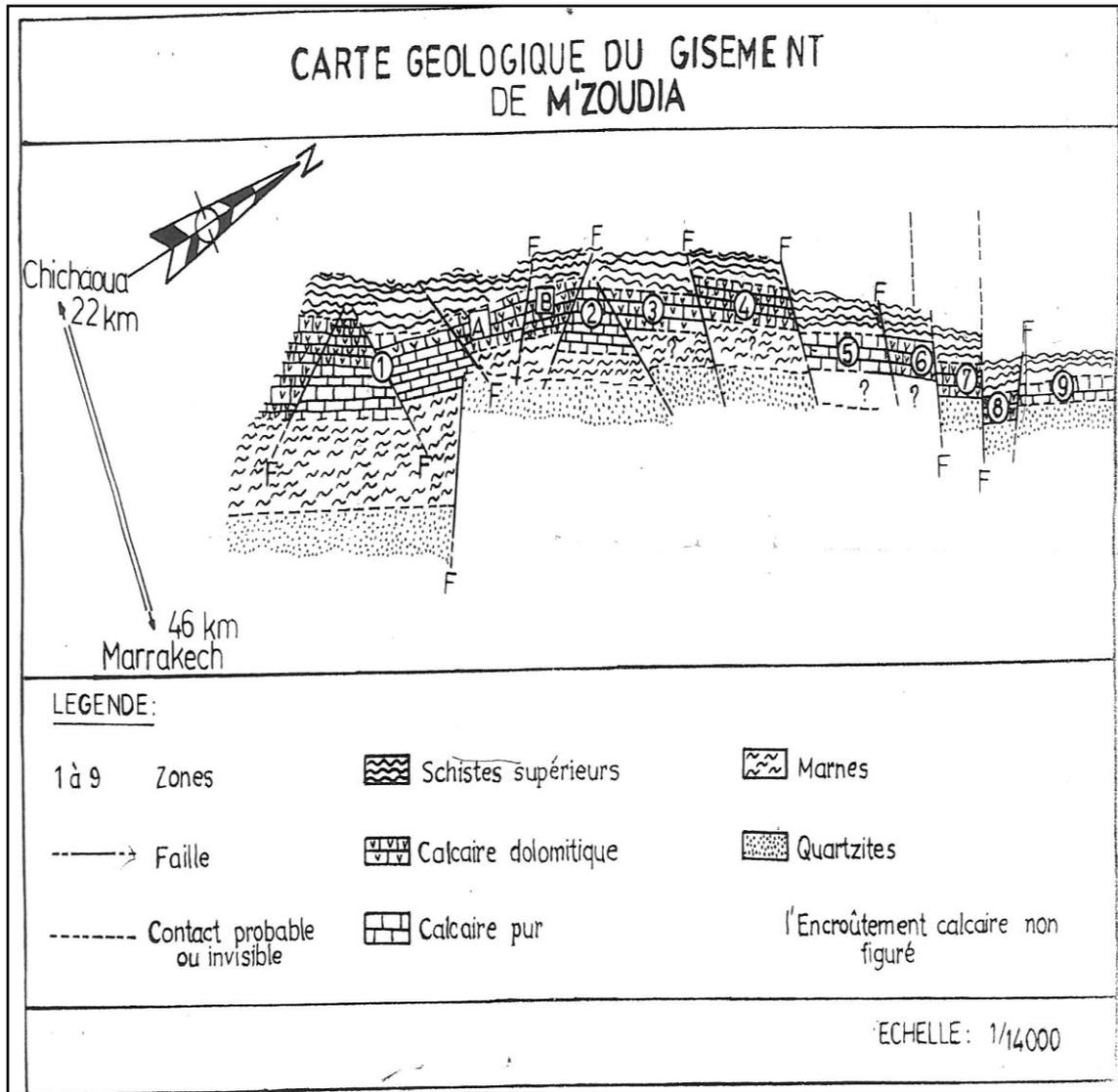


Figure8: Subdivision du gisement de M'zoudia (documents internes de la société)

L'étude du gisement nécessite une description spéciale des différentes zones :

1.5.1. Zones exploitables:

- ❖ **zone 1** : Elle renferme une quantité importante de calcaire pur et recouvert de calcaire magnésien, des schistes et les quartzites. L'exploitation partielle de cette zone a déjà eu lieu avec l'enlèvement de cinq gradins ; mais elle s'est interrompue à cause de l'émergence des eaux de la nappe phréatique. CIMAR procède actuellement au pompage pour assécher la zone et pouvoir reprendre l'exploitation.

- ❖ **Zone 2** : Elle contient aussi une quantité de calcaire, schiste, et le quartzite. L'exploitation dans cette zone a déjà été faite sur une grande partie, mais elle a été suspendue au niveau du gradin numéro 8 qui correspond à une couche dure de lithologie quartzitique, difficile à éliminer bien qu'en dessous de ces quartzite se situent des quantités importantes de calcaire pur. Des études ont proposés des solutions alternatives pour une reprise de l'exploitation, mais sans succès.

On note bien que les deux zones 1 et 2 sont affectées d'importantes failles, ce qui pourrait constituer une entrave à l'exploitation à venir

- ❖ **Zone 5** : Elle est actuellement exploitable, l'extraction se déroule encore au niveau du gradin 2, elle contient trois types de formations:
 - Schiste inférieur de direction N20 et pendage 10 vers l'ouest, et l'épaisseur de formation reste inconnue.

- Calcaire généralement est pur de coloration gris clair traversé par des veinules de calcite, des calcaires dolomitiques de dimension variable, des marnes et des marno-calcaires.

- Schiste supérieur caractérisé par des intercalations des quartzites qui peuvent atteindre plusieurs mètres.

1.5.2. Zones stériles:

- ❖ **Zone 4, 6, 7, 8**: Ces zones ne sont pas économiquement exploitables à cause du stock limité en matière première surtout le calcaire pur.

Elles contiennent essentiellement des formations quartzitiques compétentes plus abondantes riches en silice, avec des strates des calcaires dolomitiques riches en magnésie, cette composition justifie pourquoi on évite l'utilisation au niveau de ces zones.

2. Caractérisation de la carrière de M'zoudia:

2.1. Identification des matériaux premiers de la carrière M'zoudia:

Le gisement de M'zoudia est un gisement riche principalement en matériaux sédimentaires telle que les : Calcaires, Schistes, Marnes et les Quartzites. Les classifications des matériaux sont faites selon la référence établie par la société.

On distingue deux types des matériaux :

- ❖ **Les matériaux non utilisables** : qui sont des stériles définitifs : quartzites, schistes quartzitiques (schistes supérieures), les calcaires d'encroutement (en contact avec les quartzites) et enfin les calcaires fortement magnésiens (calcaires dolomitiques).
- ❖ **Les matériaux utilisables** : sont les calcaires marneux, calcaires magnésiens, calcaires d'encroutement, marnes et schistes inférieures.

La distinction de ces deux types de matériaux peut se faire par plusieurs méthodes: géochimique, minéralogique et macroscopique.

2.1.1. Reconnaissance macroscopique:

La reconnaissance macroscopique peut faciliter la gestion des matériaux de la carrière, ainsi qu'il ne demande pas beaucoup du temps et c'est la méthode la moins chère. Mais il demande une grande connaissance géologique et pétrographique.

☒ **Les Calcaires:**

a. **Le calcaire pur** : (Fig.9)

Couleur : gris à gris clair parfois même blanc avec des veinules de calcite blanche ou jaunâtre très caractéristiques.

Texture: généralement massive.



Figure 9: Photo montrant un échantillon de d'un calcaire pur de la carrière Mzoudia

- b. **Le calcaire magnésien** : c'est un mélange des minéraux de calcite (CaCO_3) et de dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) avec abondance de calcite. Lors de l'extraction, le calcaire dolomitique (ou magnésien) pose un problème d'hétérogénéité car il peut se présenter sous forme lenticulaire ou des poches dans les calcaires purs (fig.10).

Couleur : brun à rougeâtre.

Texture : caractérisé par des cristaux d'aspect brillant.



Figure 10 : Photo montrant un échantillon de calcaire magnésien (dolomitique) de la carrière M'zoudia

- c. **les calcaires marneux** : c'est un mélange de calcaire et d'argile (le % de la silice va être plus élevé par rapport aux autres calcaires). (voir Tab.3).

Couleur : gris, noir ou rouge. Parfois présente des lentilles de silice qui se manifeste par une couleur verdâtre ou jaunâtre, peu consolidé (fig. 11).

Teneur en calcite en %	100 - 95	95 - 65	65 - 35	35 - 5	5 - 0
Roches	Calcaire	Calcaire argileux	Marne	Argile calcaire	Argile

Tableau3: Terminologie des roches sédimentaires du pôle calcaire au pôle argile.



Figure11: Photo montrant un échantillon de calcaire marneux de la carrière M'zoudia

- d. **les calcaire d'encroustement** : sont des rognions de calcaires et d'autres éléments piégés dans un ciment (liant) naturel marneux, ils présentent un aspect conglomératique. On distingue 2 types de calcaires d'encroustements ; le premier est consolidé et le deuxième est un peu friable, dont les caractéristiques sont:

Couleur : beige parfois rougeâtre.

Texture : conglomératique.

❖ **Les schistes:**

Dans la carrière M'zoudia il y a notamment deux formations des schistes : schistes inférieur et schistes supérieurs. Les schistes supérieurs sont en contact avec les quartzites donc inutilisables alors que les schistes inférieurs utilisés pour leur silice et leur fer... Ils sont caractérisés par une grande diversification en fonction de composition chimique ainsi que minéralogique reflétée par la coloration et la texture.

On note la présence de nombreux plissement et fractures traduisant une activité tectonique.

Alors qu'en fonction de la couleur, Il existe deux types des schistes :

- **Schistes noirs** : plus friable et plus gras à l'état naturel (Fig. 12).
- **Schistes rouges** : ont une meilleure résistance mécanique (Fig.13).



Figure12: Photo montrant un échantillon de schiste noir de la carrière M'zoudia



Figure13: Photo montrant un échantillon de schiste rouge de la carrière M'zoudia

- ❖ **Les marnes** : est une roche sédimentaire, mélange de calcaire et d'argile dans des proportions à peu près équivalentes variant de 35 % à 65 %. Au-delà de 65 % de calcaire il s'agit d'un calcaire argileux, tandis qu'au delà de 35 % de calcaire on parle d'argile calcaire (Tableau3).

Dans la carrière de M'zoudia les formations des marnes sont rares et qui sont présentées au niveau de contact de la matière carbonatée et argileuse (calcaires- schistes) (fig. 14).

Couleur : jaunâtre mais parfois noir en contact avec les quartzites.

Texture : rubanée (litée).



Figure14: Photo montrant un échantillon marne de la carrière de M'zoudia

2.1.2. Reconnaissance géochimique:

L'identification macroscopique des différents matériaux n'est pas toujours possible vu l'hétérogénéité des formations et l'abondance du phénomène d'altération (oxydation, hydratation...) suite à l'exposition de la matière en surface.

D'où l'importance de la reconnaissance géochimique qui permet une meilleure caractérisation de la matière, la méthode utilisée par la société est celle d'analyse chimique par « fluorescence X », dont le but est de déterminer les pourcentages en oxydes (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO ...).

Les résultats obtenus pour chaque analyse nous a servi à identifier les différents matériaux en se basant sur les tableaux des valeurs limites établis par la société (voir tableau 4) :

Composition chimique des matériaux premiers (% en oxydes)						
	Calcaire pur	Calcaire dolomitique	Calcaire d'encroûtement	Calcaire marneux	Marne	Schiste inférieur
SiO ₂	<5	<10	5 à 25	10 à 25	35 à 45	40 à 60
Al ₂ O ₃	=<1	=<2	<5	<10	6 à 13	12 à 22
Fe ₂ O ₃	=<1	=<2	<3	<3	<3	4 à 10
CaO	>48	38 à 48	32 à 44	30 à 40	15 à 30	6 à 14
MgO	=<4	4 à 15	<4	<4	<3	<3
SO ₃	=<1	=<1	<1	<1	<1	<1
PF	>40	>30	>35	>30	<30	<30

Tableau4: Les normes de la composition chimique des matériaux premiers de la carrière de M'zoudia (documents internes de la société)

Notamment la fluorescence X est la méthode de reconnaissance et d'identification utilisée par l'usine, alors que minéralogiquement les résultats des pourcentages d'oxydes n'ont pas de signification. Par exemple le dioxyde de silicium (SiO₂) peut exister à l'état libre et donner le quartz, et peut ainsi exister en combinaison et donner des différents minéraux silicatés comme les minéraux d'argile, les micas...).

D'où l'importance de l'examen microscopique qui nous donne la minéralogie précise de chaque matière, même que les minéraux d'argile sont difficilement détectables sur les lames minces.

L'étude microscopique nous permet de voir et d'estimer le taux de quartz et de la calcite ainsi qu'autres minéraux.

2.2. Localisation des différents matériaux dans la carrière M'zoudia:

Sur une carte représentative ci-dessous nous avons superposé les différents matériaux existants dans les différentes zones afin d'avoir un aperçu sur la carrière M'zoudia

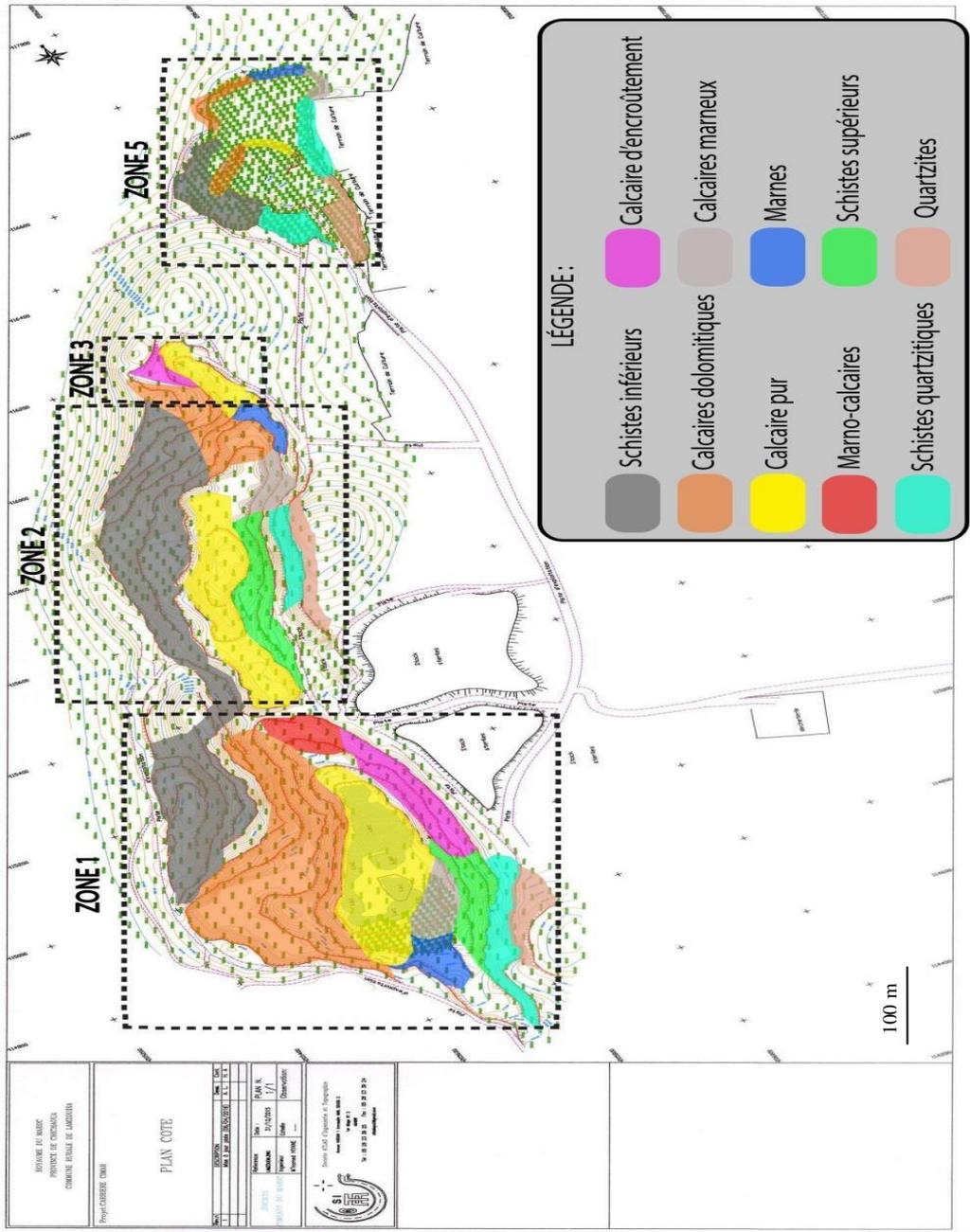


Figure15: Localisations des différents matériaux dans la carrière M'zoudia

CHAPITRE 3 :

ETUDES GEOCHIMIQUES ET MINERALOGIQUES DES MATIERES PREMIERES DE LA CARRIERE M'ZOUDIA

I. Méthodologie

1. Echantillonnage:

Afin d'atteindre notre objectif qui est d'identifier la composition chimique et minéralogique des différents matériaux premières de la carrière de M'zoudia, nous avons prélevé au total 15 échantillons correspondant à 12 échantillons sous forme des roches et 3 échantillons de Cutting. L'échantillonnage se fait au niveau des différentes zones exploitables de la carrière (zones : 1, 2 et 5).

On note que parmi les 15 échantillons prélevés, 2 sont de la carrière d'Ighoud (une sous forme de roche grossière et l'autre fine concassé).

Méthode d'échantillonnage :

Munies de notre marteau, nous avons échantillonné de façon à couvrir toute la zone explorée. Les échantillons récoltés sont issus de roches ayant les caractéristiques du faciès et sans altération. Il faut absolument prendre les roches les moins altérées, sans cassures ni fractures pouvant permettre la circulation des solutions d'éléments étrangers à la roche. Par la suite, les échantillons sont mis dans des sachets, puis numérotés à l'aide d'un stylo indélébile ou feutre de telle sorte à pouvoir identifier facilement la zone et l'endroit de sa provenance. Enfin, il faut positionner les échantillons sur une carte représentative.

On note bien que chaque échantillon prélevé subit un quartage c'est-à-dire il est divisé en deux parties ; l'une destinée à l'analyse chimique, l'autre à l'analyse minéralogique.

Le plan cote nous à servir à positionner les échantillons prélevés (Fig 16).

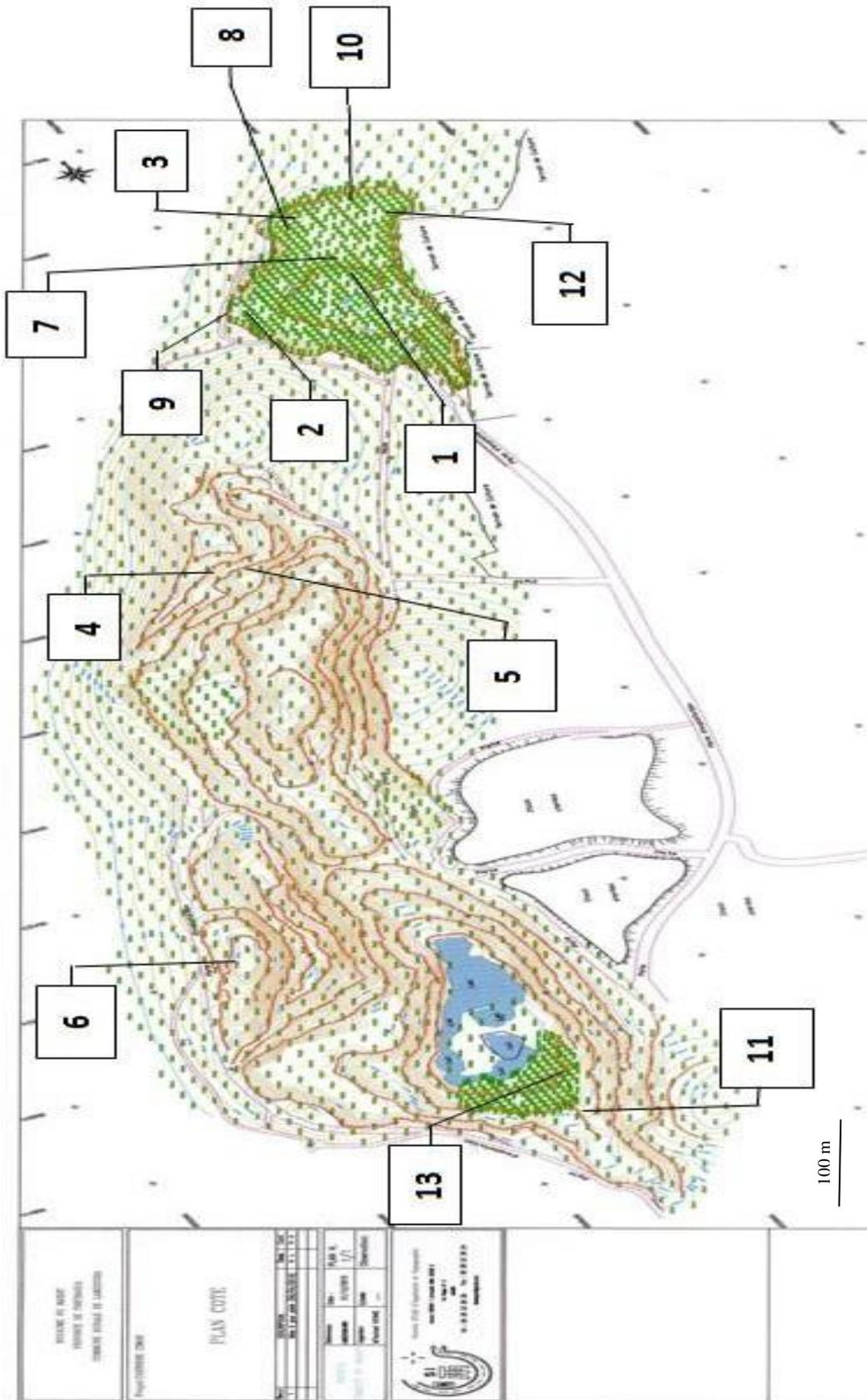


Figure16: Carte représentative des prélèvements effectués dans les différentes zones de la carrière M'zoudia

Pour mieux simplifier on va présenter les données des échantillons prélevés sous forme d'un tableau bien détaillé (voir tableau 5), la nomenclature des échantillons est propre à notre travail.

Nomenclature des échantillons :

Exemple : **Cp r3**

Cp : calcaire pur.

r : la nature de l'échantillon est roche (**C** : pour le cutting).

3 : numéro de prélèvement pour la même roche

Numéro de prélèvement	Référence de l'échantillon	Nature	Localisation de l'échantillon	Lithologie supposée
-	Cp r1	Roche fine	Carrière d'IGHOUD	Calcaire pur
-	Cp r2	Roche grossière		
1	Cp r3	Roche	Zone 5, gradin 2, coté droit	Calcaire dolomitique
7	Cp c	Cutting	Zone 5, gradin 2, coté droit	
3	Cd r1	Roche	Zone 5, gradin 1, coté droit	
8	Cd c	Cutting	Zone 5, gradin 1, coté droit	
13	Cm r1	Roche	Zone 1, gradin 6, coté gauche	Calcaire marneux
12	Cm r2	Roche	Zone 5, gradin 1, coté droit	Marne
10	M r1	Roche	Zone 5, gradin 1, coté droit	
11	M r2	Roche	Zone 1, gradin 5, coté gauche	
2	Si r1	Roche	Zone 5, gradin 1, coté gauche	
4	Si r2	Roche	Zone 2, gradin 6, coté gauche	Schiste inférieur
5	Si r3	Roche	Zone 2, gradin 5, coté gauche	
6	Si r4	Roche	Derrière zone 1	
9	Si c	Cutting	Zone 5, gradin 1, coté gauche	

Tableau5: Caractéristiques des échantillons prélevés dans les deux carrières

2. Techniques d'analyse géochimique par fluorescence X:

2.1. Préparation des échantillons

L'échantillon frais est concassé à l'aide d'un concasseur giratoire de laboratoire. Il est ensuite séché à l'étuve à 100°C, puis broyé finement à l'aide d'un broyeur. On prélève 10 g de poudre pour fabriquer une pastille à l'aide d'une presse à pastille (Planche 1).



Planche1: Appareillages de la « fluorescence X »

2.1. Principe et appareillage

La spectrométrie de fluorescence X ou XRF (X ray fluorescence) est une technique physique d'analyse. Elle permet des dosages allant de la ppm à 100% et consiste à l'irradiation d'échantillon par un faisceau de rayon X (Fig.18).

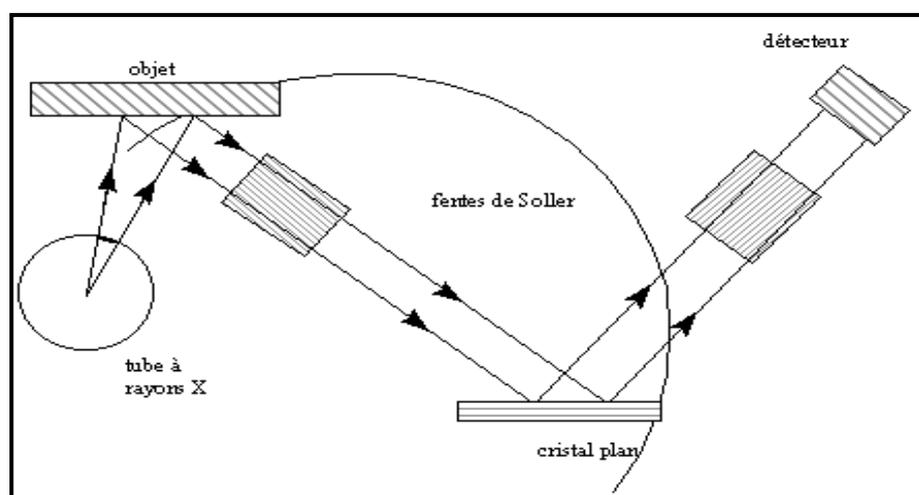


Figure17: Schéma de spectromètre à dispersion de longueur d'onde

Les radiations primaires produites par le tube à rayons X excitent les atomes de l'échantillon et produisent l'émission de raies caractéristiques ou de fluorescence dans toutes les directions.

La fraction de ces radiations qui passe à travers les fentes d'un collimateur est un faisceau parallèle dirigé sur un cristal analyseur. Ce dernier diffracte la longueur d'onde λ reliée à l'angle θ par l'équation de Bragg:

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

d : est la distance inter-réticulaire.

θ : l'angle de réflexion ou de diffraction.

N : l'ordre (1, 2, 3...) de la réflexion. Le premier ordre est le plus généralement utilisé car il correspond à de plus fortes intensités.

- L'intensité d'une raie de longueur d'onde donnée est mesurée en choisissant un cristal convenable et en positionnant un détecteur à l'angle 2θ par rapport au faisceau incident.
- En bombardant la poudre à analyser par le rayon X primaire, chaque élément produit un rayon X secondaire (ou fluorescent) qui est diffracté selon la loi de Bragg. Ces rayons secondaires sont isolés et détectés par le détecteur. La concentration de l'élément analysé est proportionnelle au nombre de coups par seconde détectés.

Deux détecteurs sont couramment employés :

- À flux gazeux : le gaz du compteur est ionisé lors du passage d'un photon X. Il permet de détecter les éléments dont le numéro atomique est compris entre le sodium et le zinc.
- À scintillation : il s'agit d'un cristal d'iodure de sodium. Ce compteur permet d'analyser les éléments de numéro atomique supérieur à celui du fer.

Éléments analysés : dix-huit éléments majeurs, mineurs et traces sont analysés quantitativement dans les silicates selon leur teneur: Si, Al, Ca, K, Ti, Fe, Mn, P, Mg, Na, Pb, Cu, Sn, Sb, Rb, Zr.

2.1.1. Avantages et limites:

C'est une technique totalement non destructive de l'échantillon. En cas de nécessité, l'échantillon peut être réanalysé plusieurs années après sa préparation. Les étalons de référence restent les mêmes dans le temps, ce qui assure une reproductibilité de l'analyse.

Limites : les éléments de numéro atomique inférieur à celui du carbone ne peuvent pas être analysés par fluorescence X.

2.1.2. Précision et sensibilité

La précision varie avec la quantité de matière disponible pour l'analyse. Elle dépend également des éléments recherchés et de la matrice dans laquelle se trouve cet élément. La sensibilité dépend de la méthode de préparation de l'échantillon et du matériau analysé. Elle varie avec les éléments chimiques. Elle approche le $\mu\text{g/g}$ quand on opère sans dilution sur un prélèvement de l'ordre du gramme (Jenkins, 1992).

3. Les techniques d'étude minéralogique:

Pour l'étude minéralogique de nos échantillons, l'examen microscopique des lames minces reste la méthode la plus possible vu à la disponibilité des matériels au laboratoire.

3.1. Examen microscopique des lames minces:

3.1.1. Préparation des lames minces:

- **Mode opératoire:**

Le procédé de confection de lames minces se fait par les étapes suivantes :

a. Le sciage:

Opération qui s'effectue à l'aide d'une scie à disque diamanté afin d'obtenir un talon (encore appelé sucre ou esquille), (voir planche 2-a-).

b. Le polissage:

Consiste à polir la surface du talon destinée au collage sur la lame de verre rodée en utilisant un abrasif (carbure de silicium) dans une gamme granulométrique de 400, 600 et 800.

La machine utilisée est appelée une rodeuse, elle permet le rodage automatique des talons, des lames porte-objet, et de la mise à épaisseur finale des lames minces. Equipée d'un porte échantillon pouvant recevoir jusqu'à 12 lames, de 2 porte-talons pouvant accepter jusqu'à 12 pièces, d'un système de contrôle et de maintien en géométrie du plateau, d'un stand de mesure de contrôle d'épaisseur, et d'un lot de consommables de mise en route, (voir planche 2-b-).

c. Le séchage:

Le talon ainsi poli est séché sur plaque chauffante à thermostat portée à une température de 70°C , (voir planche 2-c-).

d. Le rodage des lames de verre:

C'est un plissage des lames vierges, par l'abrasif 800, afin de parfaire l'adhésion lors du collage. L'appareil utilisé est le tasseau. L'épaisseur des lames rodées est mesurée par le comparateur.

e. Le collage:

Se réalise par l'utilisation d'un adhésif spécial : l'araldite. Elle est préparée par mélange instantané d'une résine et d'un durcisseur. Le collage dure 24 heures à température ambiante ou 3 heures à 70°C.

f. L'arasement:

S'effectue à l'aide de la microscie à disque diamanté et consiste à araser l'esquille pour ne garder qu'une épaisseur de l'ordre de 2 mm, (voir planche 2-d-).

g. La rectification:

Permet de ramener l'épaisseur du reste du talon arasé à 100 μm . La rectifieuse est composée d'une meule diamantée et d'un porte lame amovible dont le mouvement translatoire est contrôlé par celui rotatoire du dispositif de mesure d'épaisseur : le micromètre, (voir planche2-d-).

h. La finition:

Ultime étape de confection, elle permet d'obtenir une épaisseur de 25 à 30 μm , tout en contrôlant la qualité de la lame sous microscope optique. Un éventuel recouvrement par lamelle se fait à l'aide d'une colle spécifique : le baume de Canada, (voir planche 2 -e-).



Planche2: *photos d'appareillage de fabrication des lames minces (prises au laboratoire des lames mince de la FSTG)*

3.1.2. Examen de lames minces:

Après avoir préparé les lames minces pour chaque échantillon, on passe par la suite à leur étude à l'aide d'un microscope optique polarisant, qui consiste à effectuer un certain nombre d'observations, dont le but est de déterminer les propriétés physiques et optiques des minéraux. Ces observations vont donc permettre de décrire et préciser la nature des minéraux constituant la roche. On peut ainsi quantifier les minéraux par comparaison des quantités des minéraux de la roche entre eux. (Hervé Coulon, 1987).

- Application au dosage de quartz:

Une des techniques couramment utilisée est celle dite « **compteur de points** » : le compteur de points se compose d'une sur-platine qui se fixe sur la platine d'un microscope polarisant classique et qui est reliée par un câble électrique à un tabulateur. Chaque couche de ce dernier comporte un totaliseur automatique et correspond à l'un des constituants de la lame mince examinée.

On détermine le minéral placé à la croisée des réticules de l'oculaire du microscope et on appuie sur la touche correspondante. La sur-platine se déplace d'une distance réglée d'avance (1/3, 1/6, 1/10 ou 1/20 de mm selon la granulométrie du sédiment) et on détermine la nouvelle phase se trouvant à la croisée des fils etc. On peut ainsi balayer régulièrement, point par point, toute la surface de la préparation.

Cette technique s'utilise habituellement avec des lames minces de roches consolidées qui permettent une détermination très précise des minéraux présents. Seul le quartz est dosé par cette méthode. Un des totaliseurs du compteur de points est attribué au « quartz » et un autre aux « non quartz ».

Les résultats sont exprimés en pourcentage volumique après comptage de 200 à 300 points par préparation. (Hervé Coulon, 1987).



Figure 18: Appareillage de compteur des points

II. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

1. Résultats obtenus:

1.1. Résultats géochimiques:

Les résultats géochimiques obtenus à l'aide de la fluorescence X, sont représentés sous forme du tableau (voir tableau 6). Nous avons fait l'analyse de 15 échantillons de divers niveaux géologiques pour avoir une idée globale sur la composition chimique des matériaux.

Lithologie supposée	Référence de l'échantillon	Composition chimique (% en oxydes)											
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	BaO	Cl	P ₂ O ₅	TiO ₂
Calcaire Pur	Cp r1	1.92	0.38	0	52.19	1.12	0.01	0.11	0	0.665	0.007	0.047	0.019
	Cp r2	0.58	0.25	0.35	52.07	2.51	0	0.05	0.003	0.011	0.007	0.036	0.013
	Cp r3	0.04	0.09	0.17	55.55	0.82	0.01	0	0	0.024	0.005	0.004	0.008
	Cp c	2.71	0.57	0.35	51.06	2.17	0.01	0.11	0.007	0.005	0.006	0.010	0.040
Calcaire dolomitique	Cd r1	1.57	0.75	1.43	43.42	8.04	0	0.20	0.011	0.059	0.008	0.041	0.040
	Cd c	3.20	1.10	1.75	35.49	14.78	0.01	0.32	0.025	0.057	0.014	0.049	0.085
Calcaire marneux	Cm r1	33.83	6.03	1.50	29.54	1.30	0	1.14	0.026	0.040	0.017	0.037	0.457
	Cm r2	18.29	4.71	1.02	31.47	3.30	0	1.00	0.054	0.046	0.036	0.028	0.338
Marne	Mr1	36.78	12.70	2.90	18.59	0.82	0.065	2.62	0.191	0.046	–	0.120	0.974
	Mr2	39.44	9.49	2.24	24.36	1.17	0.10	2.57	0.125	0.022	–	0.104	0.526
Schiste inférieur	Si r1	56.88	16.49	6.87	6.47	1.01	0.062	2.74	0.246	0.066	–	0.228	1.327
	Si r2	54.20	20.47	5.75	6.66	1.68	0.126	3.58	0.232	0.067	–	0.159	1.377
	Si r3	48.31	21.08	5.72	6.14	0.96	0.143	2.40	0.321	0.071	–	0.192	1.428
	Si r4	53.50	13.41	4.96	7.35	1.53	0.047	1.97	0.210	0.064	–	0.152	1.309
	Si c	53.78	14.15	5.34	6.88	1.61	0.164	2.54	0.291	0.050	–	0.178	1.052

Tableau6: Composition chimique (% en oxydes) des différents matériaux

1.1.1. Paramètres chimiques utilisés:

- Le KHUL est le degré de saturation en chaux CaO:

$$KHUL = CaO / ((2.8 SiO_2) + (1.1 Al_2O_3) + (0.7 Fe_2O_3))$$

Si le KHUL est inférieur à 0.96 on ajoute du calcaire pur.

Si le KHUL est supérieur à 0.96 on ajoute des marnes.

- Le module silicique noté MS est le taux de SiO₂:

$$MS = SiO_2 / (Fe_2O_3 + Al_2O_3)$$

Une bonne matière première doit avoir un module silicique <4, dont la silice est apparait sous forme combinée tel que les micas et les argiles.

- Le module allumino-ferrique noté A/F:

$$A/F = Al_2O_3 / Fe_2O_3$$

Si A/F est <1.85 on ajoute des cendres de pyrrhotite

Si A/F est >1.85 on ajoute des marne

- La magnésie MgO, lorsqu'elle dépasse 3% dans les matières crues, elle générera des gonflements qui de fait, entraînent une diminution des caractéristiques mécaniques du béton. De ce fait, certaines couches de la carrière peuvent être inadéquates à une utilisation en cimenterie (tels que les dolomies, les basaltes...) et doivent être mis aux stériles.

1.1.2. Calcul des paramètres:

À l'aide d'un classeur Excel nous avons calculés les paramètres chimiques qu'on va les présenter sous forme du tableau (tableau 7) :

Lithologie supposée	Référence	Composition chimique				Paramètres chimiques calculés		
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MS	Khul	A/F
calcaire pure	Cp r1	1,92	0,38	0	52,19	5,05	10,13	-
	Cp r2	0,58	0,25	0,35	52,07	0,97	32,58	0,71
	Cp r3	0,04	0,09	0,17	55,55	0,15	496,2	0,53
	Cp c	2,71	0,57	0,35	51,06	2,95	7,6	1,63
calcaire dolomitique	Cd r1	1,57	0,75	1,43	43,42	0,72	11,7	0,52
	Cd c	3,2	1,1	1,75	35,49	1,12	6,4	0,63
calcaire marneux	Cm r1	33,83	6,03	1,5	29,54	4,49	7,99	4,02
	Cm r2	18,29	4,71	1,02	31,47	3,19	6,51	4,62
Marne	M r1	36,78	12,7	2,9	18,59	2,36	16,18	4,38
	M r2	39,44	9,49	2,24	24,36	3,36	12,23	4,24
Schiste inférieur	Si r1	56,88	16,49	6,87	6,47	2,43	22,99	2,4
	Si r2	54,2	20,47	5,75	6,66	2,07	26,59	3,56
	Si r3	48,31	21,08	5,72	6,14	1,8	27,24	3,69
	Si r4	53,5	13,41	4,96	7,35	2,91	18,27	2,7
	Si c	53,78	14,15	5,34	6,88	2,76	19,35	2,65

Tableau7: Représentation des paramètres calculés pour chaque échantillon

1.2. Résultats minéralogiques:

L'étude minéralogique dans notre cas est purement microscopique. L'examen microscopique des lames minces nous a permis de déterminer la minéralogie de chaque lames et parfois même la chronologie des événements au cours de la minéralisation. Ainsi, à l'aide d'un compteur de points on peut calculer le taux de quartz pour chaque lame afin d'estimer leurs teneurs dans les différentes zones de la carrière.

1.2.1. Descriptions des lames minces:

Les dix lames confectionnés sont nommées respectivement de E1 jusqu'au E11 avec la E4 n'est pas confectionnée en sucée car la roche est friable. (Voir planche x si dessous)

E1 : schiste inférieur (Si r1)

Minéralogie : minéraux d'argiles + microsparite + des minéraux philitieux (la muscovite). La lame montre une alternance des lits sombres et clairs donc un litage, cette structure nous informe que le milieu de dépôt est calme. Ainsi, les minéraux présentés suivent la même direction dont les minéraux philietux sont plus au moins allongés, ce qui justifie que la matière est affectée par des contraintes tectonique (déformation), alors qu'on peut parler d'un métapélite. Aussi l'altération est présentée sous forme des plages sombre (noires) donc la matière est oxydée.

E2 : calcaire marneux (Cm r2)

Minéralogie : minéraux d'argile + calcite + des minéraux micacés d'aspect brunâtre. La lame présente des plages carbonatées (calcite) claires intercalés au sein d'une phase micacée d'aspect brunâtre qui est en contact avec la matière argileuse bien évidente. L'apparition de certaines microstructures (microfractures) peut confirmer que la déformation tectonique est plus au moins importante. Ainsi, l'oxydation est bien visible.

E3 : schiste inférieur (Si r4)

Minéralogie : très riche en quartz + minéraux d'argiles. La lame montre une intense fracturation dont le remplissage est par la sparite et parfois par le quartz. Ce dernier est présenté sous forme des grains grisâtres clairs avec des dimensions variés et parfois ils sont regroupés par des plages évidentes. La sparite est généralement localisé au niveau des fractures qui coupent la lame à différentes directions. Ainsi l'oxydation est bien observée.

E5 : Marnes (M r2)

Minéralogie : calcite + microsparite. La lame est difficilement examinée vu que la dimension de la matière est plus fin, alors qu'on arrive juste à détectera la microsparite présente dans des plages étendues sous forme des grains très fins, ainsi certains grains de calcite polarisent dans des teintes vives et les grains de quartz sont peu comptés. L'observation des certains fractures peut confirmer une déformation faible de la roche.

E6 : schiste noir (Si r2)

Minéralogie : très riche en quartz + grains de calcite + sparite.

La lame montre un faciès schisteux quartzique justifié par l'abondance des grains de quartz occupant des vastes plages qui sont coupées par des grosses fractures remplies par la sparite. Ainsi certains grains de calcite secondaire sont visible des endroits que des autres. L'abondance de quartz peut justifier les circulations des fluides siliciques au niveau de la formation schisteuse.

E7 : schiste inférieur (Si r3)

Minéralogie : minéraux d'argiles d'aspect brun + calcite + quartz + les oxydes. La lame nous montre la présence des poches et des enclaves de quartz donc la cristallisation est purement tardive. Les minéraux argileux présentent des plages ou des fractures d'aspect brunâtre, ainsi la présence des faibles quantités de la calcite.

E8 : calcaire pur (Cp r3)

Minéralogie : beaucoup de calcite + quartz La lame montre un faciès purement carbonaté dont la calcite est plus abandonnée au niveau de la lame, elle est sous forme des rhomboédres avec des clivages bien visible aussi que la coloration qui se polarisent dans des teintes vives. Ainsi Le quartz est concentré dans les fractures, il est secondaire et entouré par des oxydes.

E9 : calcaire dolomitique (Cd r1)

Minéralogie : calcite + dolomite + quartz + minéraux d'argiles. La lame présente des différentes phases minéralogiques dont la calcite est bien visible sous formes des grains et parfois des rhomboédres ; la dolomite est difficilement distinguée microscopiquement de la calcite, mais on peut la détecter au niveau des fractures sous formes des losanges entourés par la calcite, donc on peut dire que la dolomite est secondaire résulte de la circulation des fluides magnésiens au niveau des fractures ce qui provoquer le phénomène de la dolomitisation, et par conséquent avoir un calcaire dolomitique. Ainsi la matière argileuse et les grains de quartz localisés au niveau des fractures peuvent indiquer un dépôt tardif.

E10 : calcaire pur d'Ighoud (Cp r2)

Minéralogie : beaucoup de calcite + grains de quartz. La lame présente l'abondance de la calcite qui occupe la totalité de la lame, ce qui confirme que c'est un calcaire pur. Sur certaines plages de calcite on observe des grains de quartz de faible quantité et qui peut aussi occuper des microfractures, donc le mode de cristallisation est secondaire suit aux circulations hydrothermales.

E11 : calcaire marneux (Cm r1)

Minéralogie: calcite + plage de sparite La lame nous montre des quantités importantes de la calcite mélangée par des fractions argileuses plus évidentes, l'apparition du quartz reste négligée. La sparite apparie par endroits la sparite. Ainsi, la présence des fossiles: brachiopodes, échinodermes et lamellibranches justifie que le milieu de dépôt est forcément marin, alors qu'on peut parler d'un calcaire bioclastique.

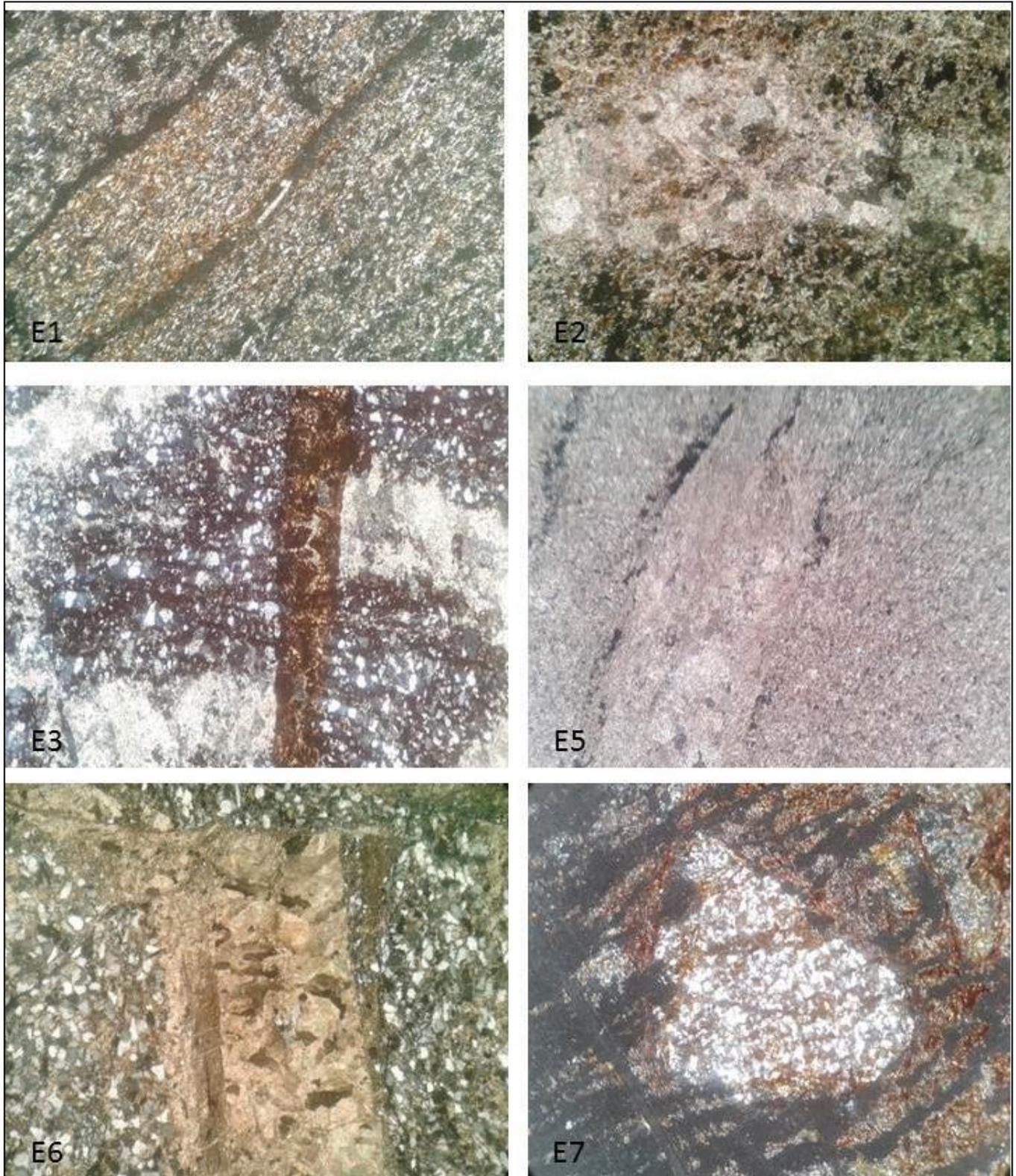


Planche3: *photographie des lames minces (Grossissement*100)*

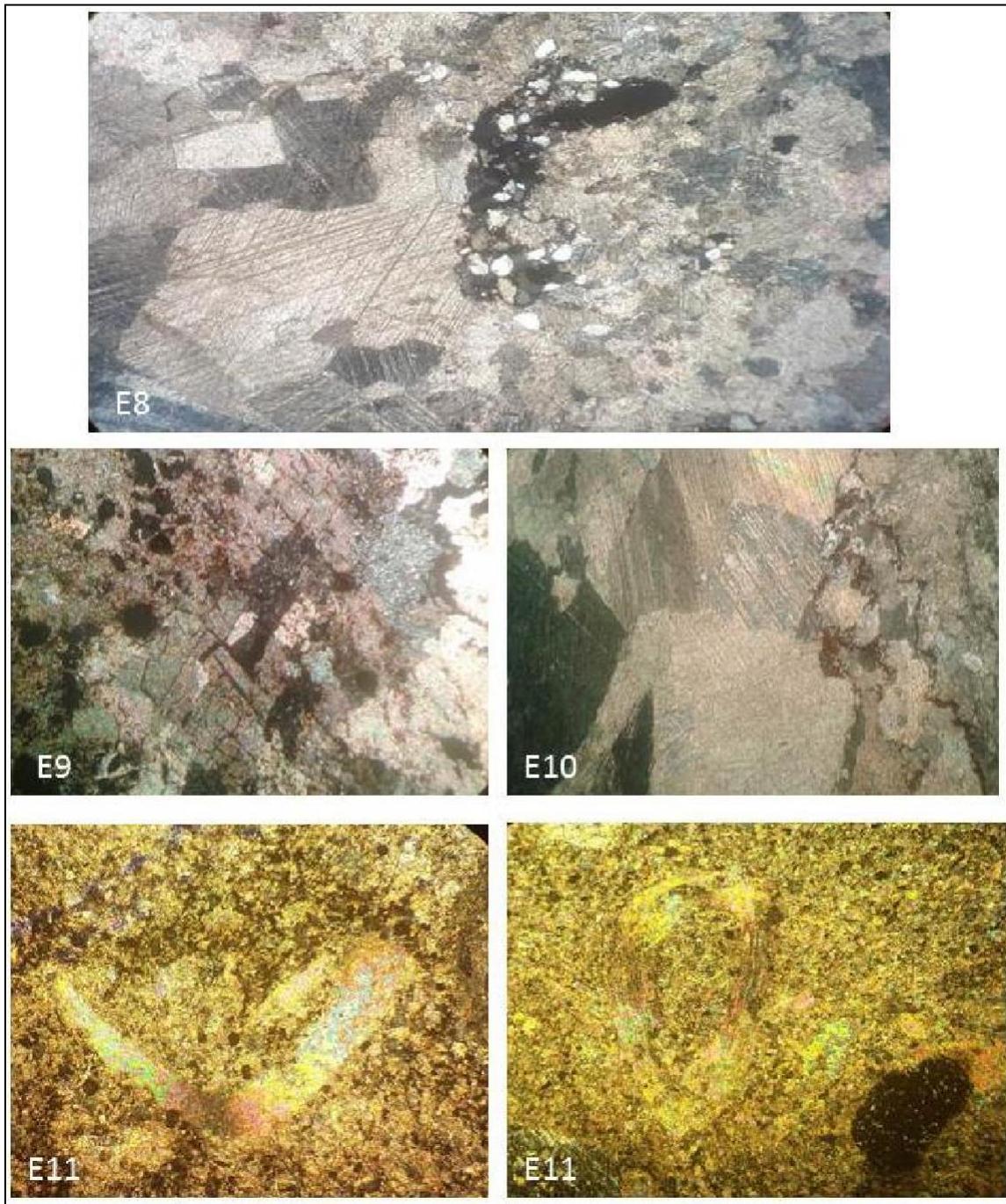


Figure1: *photographie des lames minces (Grossissement*100)*

1.2.2. Calcul du taux de quartz dans les lames:

L'estimation de la quantité du quartz par rapport aux autres constituants minéralogiques sur les lames minces (tableau 8) montre que les faciès schisteux (schistes inférieurs) présentent des quantités quartziques plus remarquables (comprises entre 3,9% et 70,2%) que les autres faciès sédimentaires (calcaires, dolomies, marnes ...) dont les quantités varient entre 0.8% et 5%.

Indice des lames minces	Référence de l'échantillon	Les minéraux observés par ordre d'abondance	Composition minéralogique(%)	
			quartz	Non quartz
E1	Si r1	minéraux d'argiles + microsparite + la muscovite	3,9%	96,1%
E2	Cm r2	minéraux d'argile + calcite + des minéraux micacés	2,6%	97,4%
E3	Si r4	quartz + minéraux d'argiles	70,2%	29,8%
E5	M r2	calcite + microsparite	4,2%	95,8%
E6	Si r2	quartz + calcite	55,8%	44,2%
E7	Si r3	minéraux d'Argiles + calcite	8,2%	91,8%
E8	Cp r3	calcite + quartz	5,0%	95,0%
E9	Cd r1	calcite + dolomite + minéraux d'argile	2,3%	97,7%
E10	Cp r2	calcite + quartz	1,3%	98,7%
E11	Cm r1	calcite + sparite	0,8%	99,2%

Tableau8: Résultats minéralogiques synthétiques

2. Interprétations:

Après avoir les résultats géochimiques et minéralogiques, on peut qualifier les différents matériaux étudiés par une simple comparaison entre le chimisme et la minéralogie de chaque roche tableau si dessous.

Lithologie supposée	Référence de l'échantillon	Composition chimique					Composition minéralogique (en %)	
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Quartz	Non quartz
Calcaire Pur	Cp r1	1.92	0.38	0	52.19	1.12		
	Cp r2	0.58	0.25	0.35	52.07	2.51	1,3	98,7
	Cp r3	0.04	0.09	0.17	55.55	0.82	5	95
	Cp c	2.71	0.57	0.35	51.06	2.17		
Calcaire dolomitique	Cd r1	1.57	0.75	1.43	43.42	8.04	2,3	97,7
	Cd c	3.20	1.10	1.75	35.49	14.78		
Calcaire marneux	Cm r1	33.83	6.03	1.50	29.54	1.30	0,8	99,2
	Cm r2	18.29	4.71	1.02	31.47	3.30	2,6	97,4
Marne	Mr1	36.78	12.70	2.90	18.59	0.82		
	Mr2	39.44	9.49	2.24	24.36	1.17	4,2	95,8
Schiste inférieur	Si r1	56.88	16.49	6.87	6.47	1.01	3,9	96,1
	Si r2	54.20	20.47	5.75	6.66	1.68	55,8	44,2
	Si r3	48.31	21.08	5.72	6.14	0.96	8,2	91,8
	Si r4	53.50	13.41	4.96	7.35	1.53	70,2	29,8
	Si c	53.78	14.15	5.34	6.88	1.61		

Tableau9: Comparaison des résultats géochimique et minéralogique

Sachant que la silice est le constituant chimique principal des certains matériaux (schistes, marnes ...), alors qu'il est nécessaire de voir les phases minéralogiques (quartz ou autres) qui le correspondent.

Dans notre cas, c'est largement suffisant de focaliser sur la variation de la silice en fonction de quartz afin de distinguer les matériaux quartziques parmi les autres :

- Pour les calcaires purs, les calcaires dolomitiques, les marnes et les calcaires marneux, les teneurs en silice varient (0,04 % jusqu'à 39,44%) et que le taux du quartz ne dépasse pas 5%, alors que ces matériaux ne sont pas quartziques.
- Pour les schistes inférieurs, les teneurs en silice varient (48,31% jusqu'à 54,20) et que le taux du quartz aussi varie de 3,9% jusqu'à 70,2%. Donc on peut parler de 2 types des schistes inférieurs:
 - Schistes inférieurs quartziques : **Si r2** et **Si r4**, dont les teneurs en silice sont traduites généralement par le quartz.

- Schistes inférieurs argileux : **Si r1** et **Si r3**, dont les teneurs en silice présentent un taux faible de quartz, ce qui justifie que la silice peut être combinée sous forme d'autres phases minéralogiques (ex : minéraux d'argiles, muscovite, chlorite...).

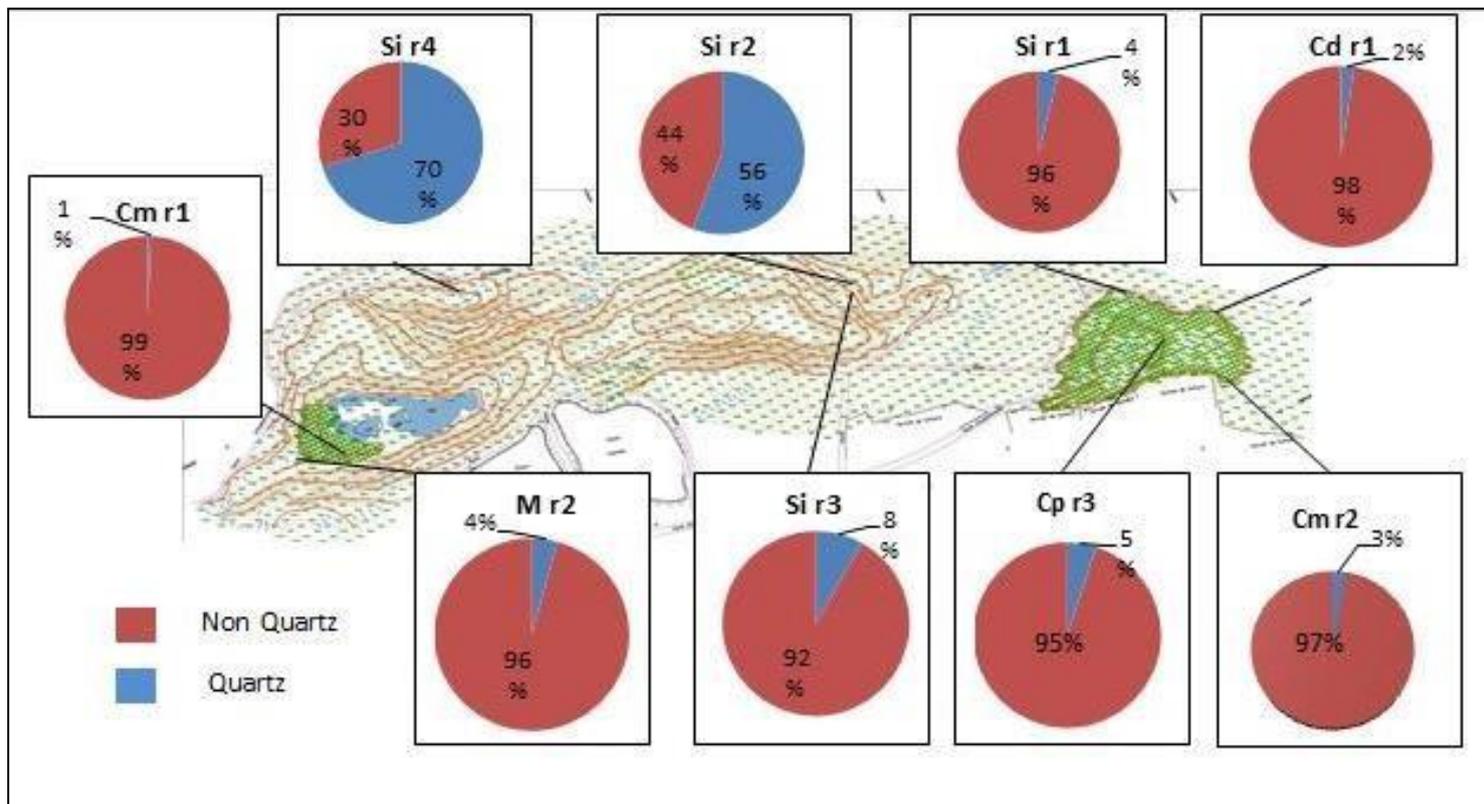


Figure19: Projection des résultats de taux de quartz sur la carte des prélèvements

III. Etude détaillée de des schistes inférieurs

Suite dépouillement des analyses chimiques et les observations microscopiques, il s'avère que les schistes inférieurs présente une diversification intéressante et qui mérite d'être détaillé.

1. La diversification des schistes inférieurs (Zone 5):

Afin de mieux comprendre l'hétérogénéité des schistes inférieurs la zone 5 de la carrière M'zoudia, nous avons entrepris une macroscopique et un échantillonnage pour la géochimie en vue d'une caractérisation de ces faciès pour une éventuelle exploitation dans l'avenir.

1.1. Echantillonnage:

De la même façon que l'échantillonnage précédent, nous avons pris 7 échantillons de schistes dans des différents endroits du gradin 1 de la zone 5, le prélèvement des échantillons est en fonction de changement de couleur et/ou de texture. Chaque échantillon porte une référence suivant la numération des prélèvements effectués.

Remarque : pour un même endroit on a prélevés deux échantillons de schiste 2 et selon la coloration ils ont comme référence :

2V : pour des schistes 2 caractérisés par une coloration verdâtre.

2R : pour des schistes 2 caractérisés par une coloration rougeâtre.

La carte représentative ci-dessous (Figure 21) nous a servi à positionner les échantillons prélevés au niveau des différents endroits du gradin 1 de la zone 5.

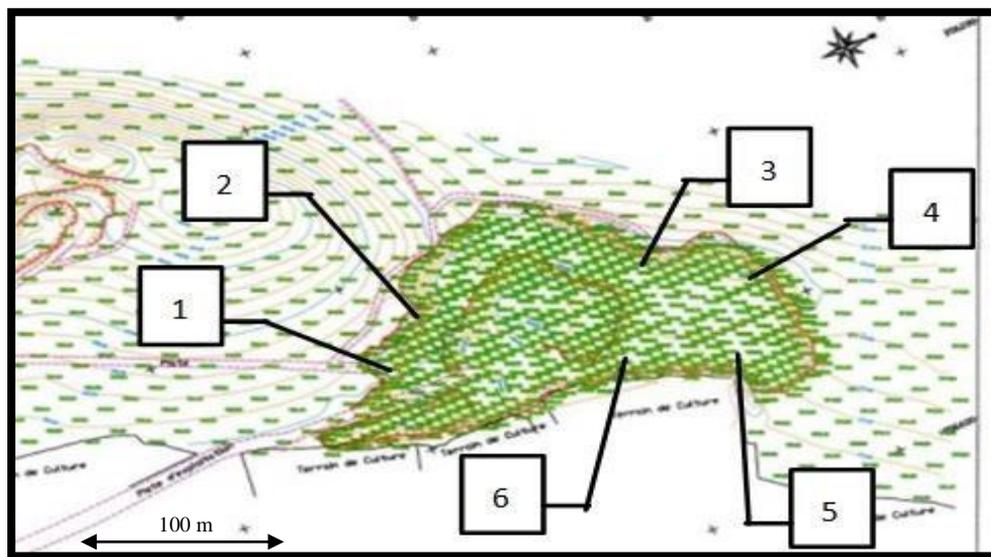


Figure20: Carte représentative de localisation des échantillons prélevés

2. Le Gradin n°1 de la Zone5:

Le gradin 1 de la zone 5 où nous avons effectué les prélèvements d'échantillon et couvert par les photos de la planche suivante qui montre l'aspect macroscopique des différents niveaux échantillonnés du gradin 1 de la zone 5. Les photos ci-dessous (planche 4) sont numérotés (de 1

jusqu'à 5) suivant le trajet dont l'échantillonnage été effectué depuis le coté gauche du gradin jusqu'au coté droit.

En Passant du coté gauche du gradin vers le coté droit, le changement du facies est bien observé et justifié par la coloration qui varie du verdâtre, du grisâtre, du brun jaunâtre et le rougeâtre. Cette variation se voit aussi en termes de compétence des formations des niveaux compétents d'une part et d'autres qui sont friables d'autre part.

De vue structural, l'affleurement les couches sédimentaires montre une direction de NS à pendage variable de 30° à 60° S-E. Notamment la déformation des couches est bien évidente même s'elle est faible, et qui est traduite par des failles normales ayant une direction E-W associés parfois à des plissements et des chevauchements qui sont bien visible.

Tous ces critères macroscopiquement observés nous permettent de dire qu'il ya une hétérogénéité dans les affleurements de la zone 5, d'où la nécessité de faire des analyses géochimiques afin de caractériser les matériaux et préciser les endroits à exploité pour le ciment.

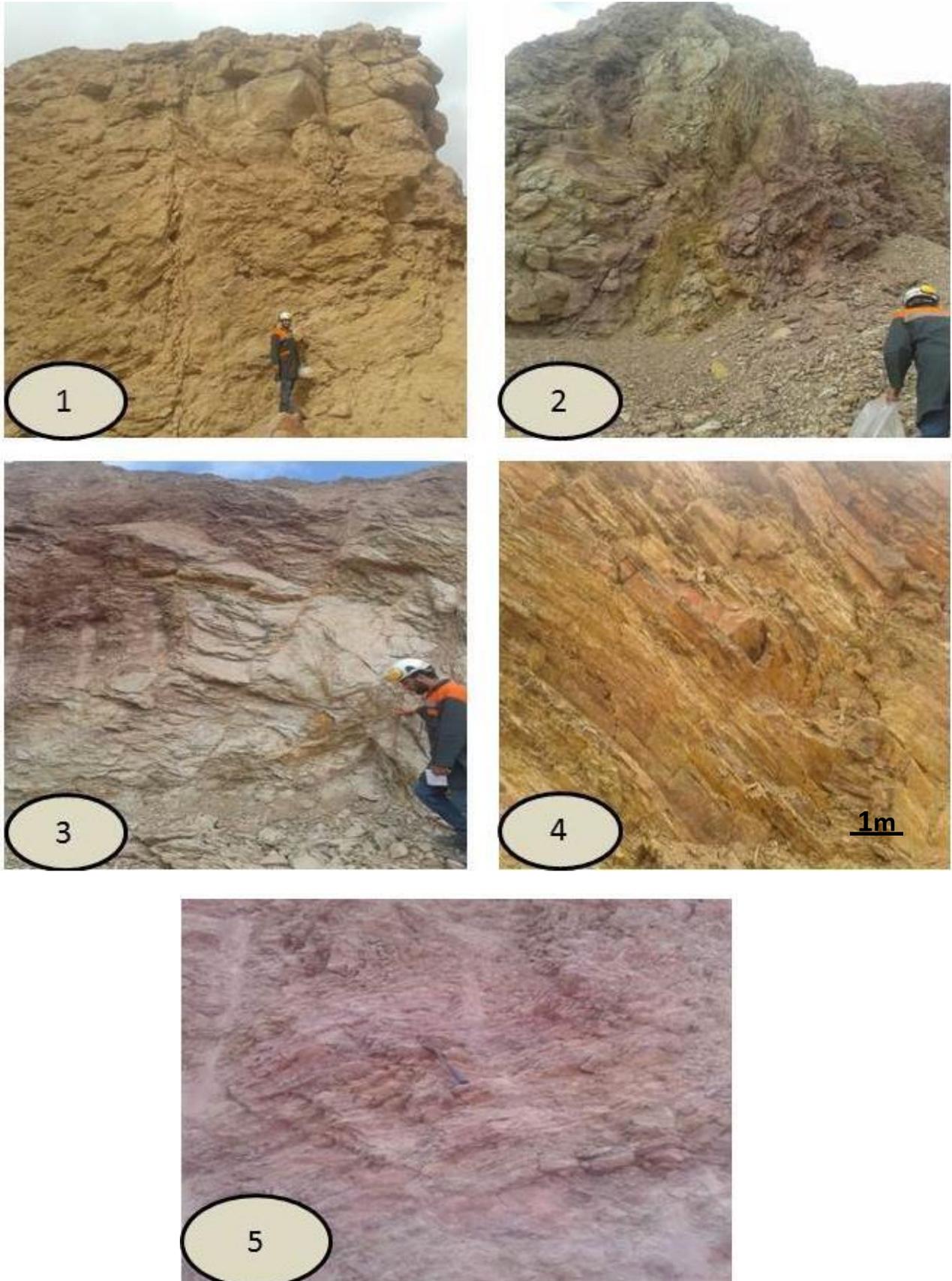


Planche4: *Aspect macroscopique des schistes inférieurs sur le gradin 1 de la zone5*

2.1. Etude géochimique des schistes:

2.1.1. Résultats:

Du même principe que l'étude géochimique précédente, la technique d'analyse par fluorescence X nous a permis de connaître la composition chimique des différents schistes afin de traduire le terme de l'hétérogénéité des matériaux.

Le tableau (9) ci-dessous présente les teneurs en oxydes (en %) pour chaque échantillon analysé :

		Composition chimique (% en oxydes)										
Référence de l'échantillon		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	BaO	P ₂ O ₅	TiO ₂
1		58.40	13.14	3.34	5.20	2.82	0.038	1.06	0.081	0.039	0.092	0.838
2	vert	52.48	13.53	4.61	9.26	0.62	0.056	1.85	0.151	0.048	0.185	1.019
	rouge	51.77	22.95	6.22	0.71	1.11	0.037	3.28	0.285	0.080	0.212	1.591
3		57.80	21.48	4.32	0.43	0.79	0.038	2.59	0.422	0.075	0.230	1.498
4		52.99	21.79	5.07	2.76	0.90	0.054	2.99	0.451	0.068	0.175	1.399
5		63.81	15.47	2.71	2.27	1.10	0.056	2.59	0.254	0.052	0.121	1.109
6		63.31	11.56	2.17	6.50	0.45	0.035	1.61	0.131	0.037	0.107	0.785

Tableau10: composition chimique des différents schistes du gradin 1 – zone5

2.1.2. Lecture et description:

Après avoir obtenu les résultats géochimiques sous formes des teneurs en oxydes, on peut traduire le terme d'hétérogénéité chimiquement tout en comparant les teneurs d'oxydes des différents schistes :

- **Pour la silice (SiO₂):**

La teneur en SiO₂ varie entre 51,77 % (schiste 2R) et 63,81 % (schiste 5).

- **Pour l'alumine (Al₂O₃):**

La teneur en Al₂O₃ varie entre 11.56 % (schiste 6) et 22.95 % (schiste 2R).

- **Pour l'oxyde de fer (Fe₂O₃):**

La teneur en Fe₂O₃ varie entre 2.17 % (schiste 6) et 6.22 % (schiste 2R).

- **Pour la chaux (CaO):**

La teneur en CaO varie entre 0,43 % (schiste 3) et 9.26 % (schiste 2V).

- **Pour la magnésie (MgO):**

La teneur en MgO varie entre 0,45 % (schiste 6) et 2.82 % (schiste 1).

2.1.3. Variation latérale du chimisme des schistes

On a figuré le changement de la composition chimique des différents schistes sous forme des diagrammes de type camembert (voir figure 24).

Et pour mettre en évidence la variation latérale du chimisme des schistes. On a réalisé des profils de changement des teneurs en oxydes en fonction des différentes stations (prélèvements). On a établie deux familles des profils latéraux : E-W (4, 5 et 6)(figure 24) et N-S(1 , 2 et 3)(figure22)

Les gens de la société utilisent les mots droit et gauche pour la localisation au niveau des gradins, nous on va utiliser la langue scientifique des direction (Nord, Sud, Ouest et l'Est).

Les profils E-W nous donnent les variations du chimisme entre la partie Ouest et Est du gradin. Et la même chose pour les profils N-S.

➤ Les profils N-S (1, 2 et 3):

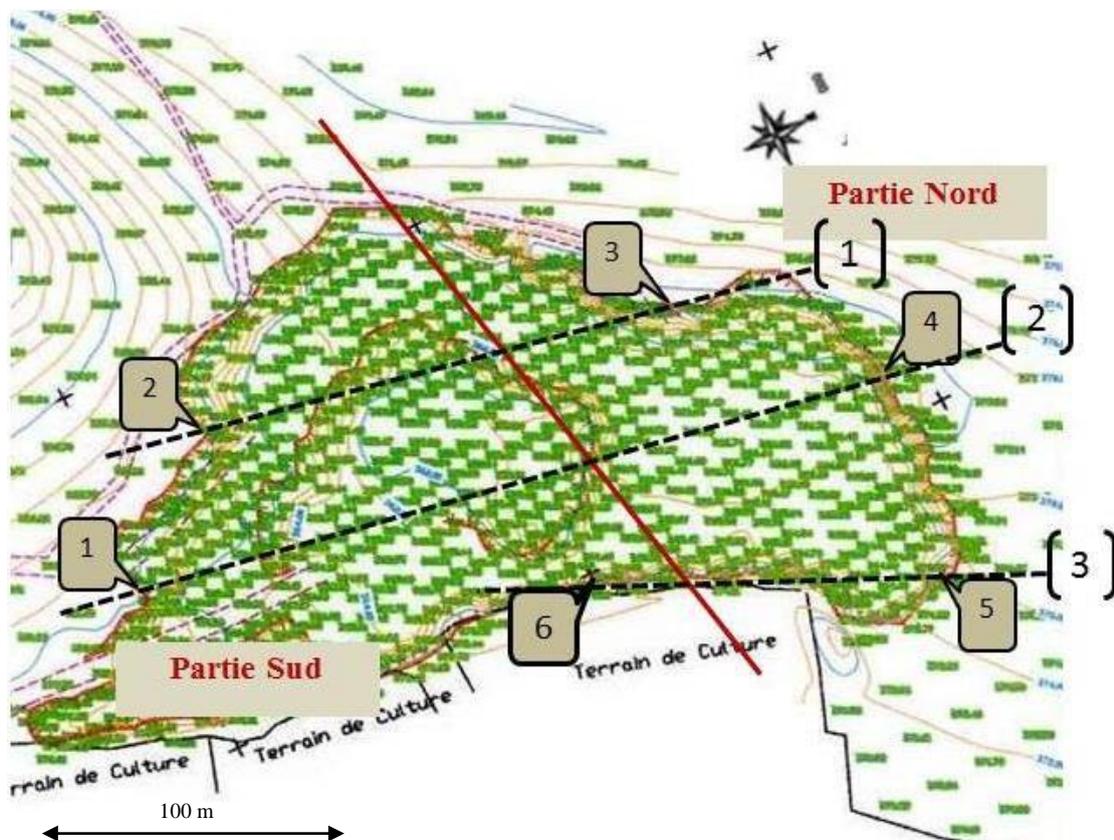


Figure21: Les profils E-W établie en fonction des prélèvements

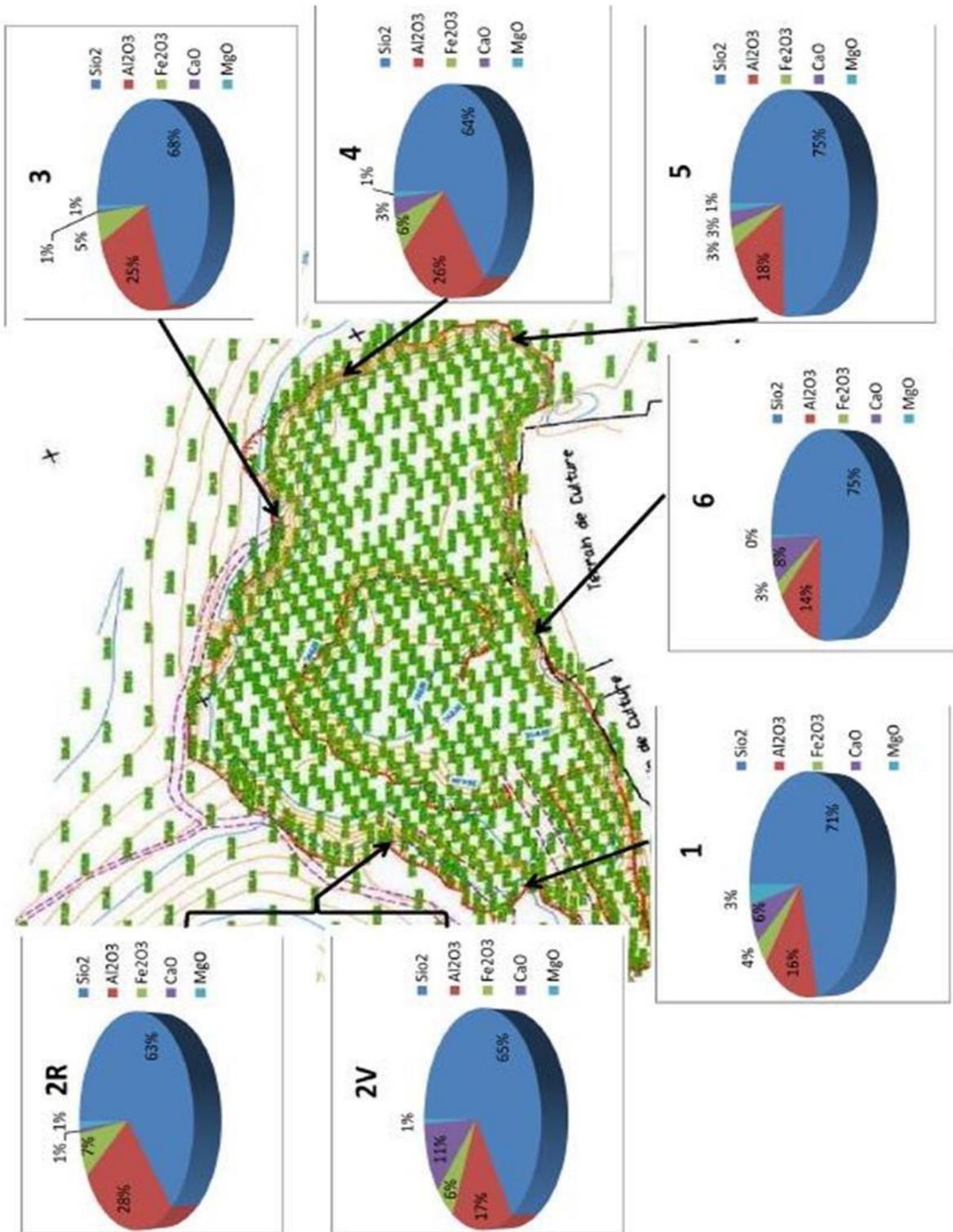
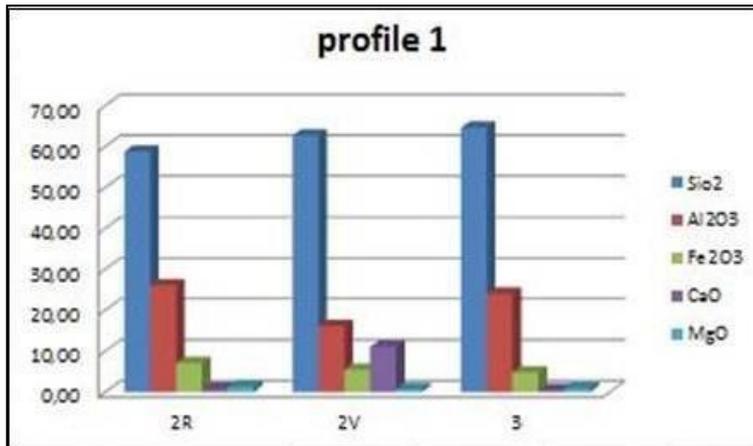
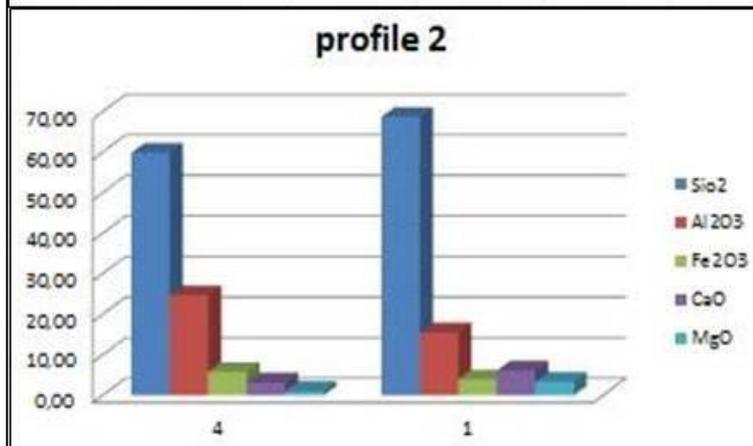


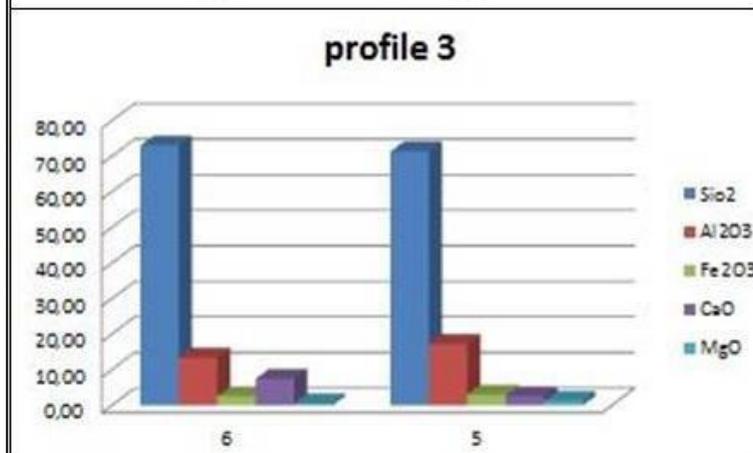
Figure 22: La composition chimique en éléments majeurs des schistes inférieurs de la zone 5



On remarque l'augmentation du pourcentage de la SiO₂ de la partie sud (2) vers la partie nord (3), accompagnée par une diminution en Fe₂O₃ et de CaO dans le même sens.



De 1 à 4 il y a une diminution en pourcentage de SiO₂ et de CaO, et une augmentation des pourcentages d'Al₂O₃ et de Fe₂O₃.



Même variation que celui de profile 2, une diminution du SiO₂ et de CaO, et augmentation des pourcentages d'Al₂O₃ et de Fe₂O₃.

Ces profils N-S montrent que généralement la partie sud est plus riche en SiO₂ très probablement le quartz, et que la partie nord à l'exception de la formation d'où on a prélevé l'échantillon 3 est profitable pour la fabrication du ciment grâce au pourcentage de la silice moins élevé et à la présence importante de Fe₂O₃ et Al₂O₃.

- Les profiles E-W (4, 5 et 6):

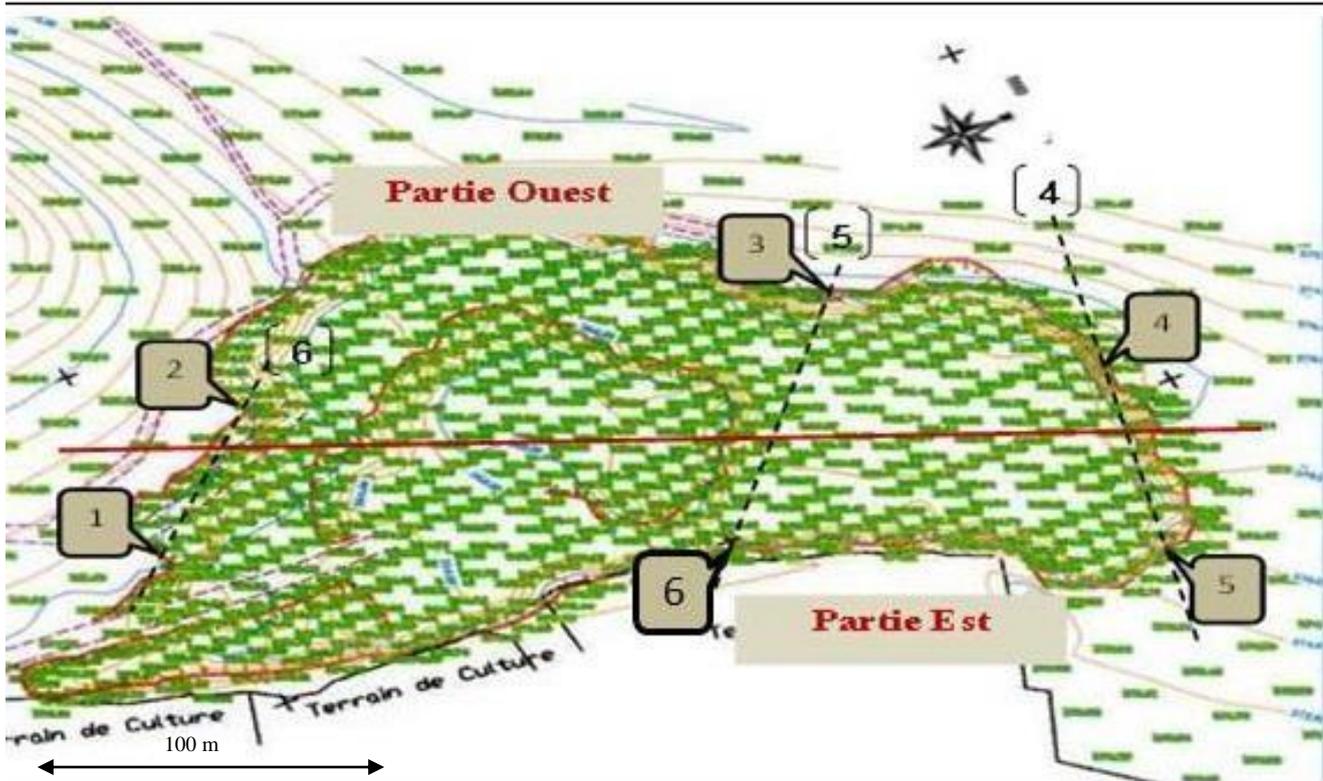
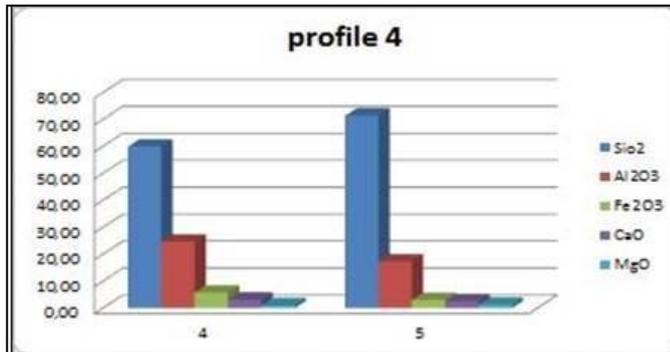
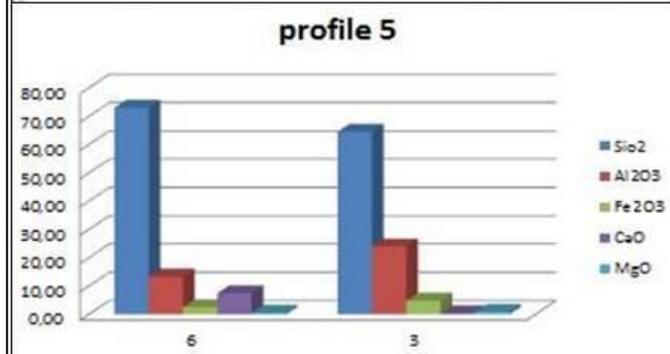


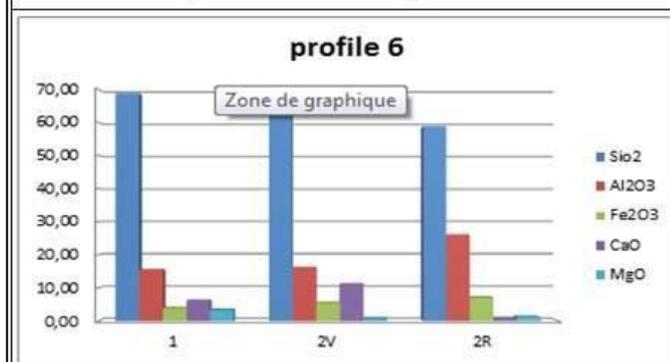
Figure23: Les profiles E-W établie en fonction des prélèvements



En passant de la partie Ouest (4) à la partie Est (5) la SiO₂ augmente, et on remarque aussi une diminution de Fe₂O₃ et Al₂O₃



Même variation en passant de 3 à 6 il y a une augmentation du SiO₂, accompagné d'une diminution de Fe₂O₃ et Al₂O₃.



Augmentation de SiO₂ et diminution de Fe₂O₃ et Al₂O₃ en passant de 2 (à savoir 2V et 2R) à 1

Les mêmes remarques sont faites en passant successivement de la partie Ouest (2, 3 et 4) à la partie Est (1, 6 et 5) augmentation de la SiO₂ et diminution de Fe₂O₃ et Al₂O₃.

Donc diminution de la qualité des schistes dans la partie Est.

Récapitulatif :

D'après les trois premiers profils 1,2 et 3 On conclut que la partie Est de la zone 5 est plus riche en silice (SiO₂) que la partie Ouest. Et depuis les trois autres profils 4, 5 et 6 on déduit que la partie sud est plus silicique que la partie nord.

La corrélation de ces résultats géochimiques avec l'aspect de terrain nous ne surpris pas puisque au niveau des parties Est et Sud de gradin 1 de la zone 5 on note la présence de bandes de quartzite intercalaire dans les schistes inférieurs de ces deux parties.

Remarque :

- Plus les schistes sont en contact avec les quartzites, plus la teneur de la silice augmente (schiste5)
- Les formations carbonatées (calcaires ou dolomies) peuvent influencer sur la composition des schistes voisinages de telle sorte à avoir des fortes teneurs de la chaux (schiste 2V) ou de la magnésie (schiste1).

3. Réalisation des sections verticales au niveau des formations exploitées:

On propose cette méthode qui va être très utile spécialement dans le cas de la carrière M'zoudia où il y a une grande hétérogénéité de matières.

Cette méthode consiste à prévoir la composition d'une portion de formation exploitée avant de l'exploser. À partir de cette méthode on peut faire des coupes verticales même en 3D à partir des refus du forage.



Figure24: Photo d'exécutions des Forages au niveau des formations exploitées

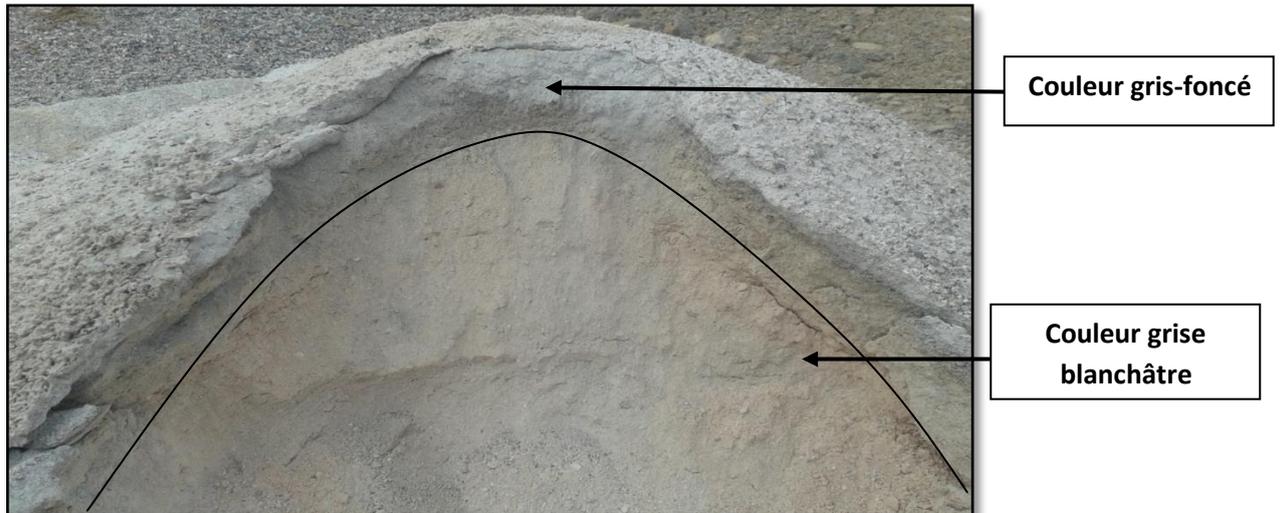


Figure25: Coupe verticale de refus pyramidique (cutting)

Au cours du forage, les refus sont déposés sous forme pyramidique à coté du trou réalisé par une foreuse à chenille (figure 28). Ces pyramides de farine appelée cutting rarement utilisable. Cette pyramide montre les formations avec une superposition inverse par rapport à la position réelle sur le terrain. De la base seront au sommet et celle du sommet seront à la base. Sur une coupe de la pyramide au niveau du plan de symétrie on peut remarquer facilement une alternance des bandes avec des couleurs différentes (figure 29).

Devant la coupe verticale au niveau d'un cutting on peut observer une hétérogénéité des couleurs ou pas (même couleur), pour les deux cas on prend soit un ou plusieurs échantillons de masse de 50 { 100g pour chaque faciès. L'analyse chimique de ces échantillons nous donne la nature des niveaux formant le gradin. On peut aussi avoir une idée sur l'épaisseur de chaque formation par une simple calcul.

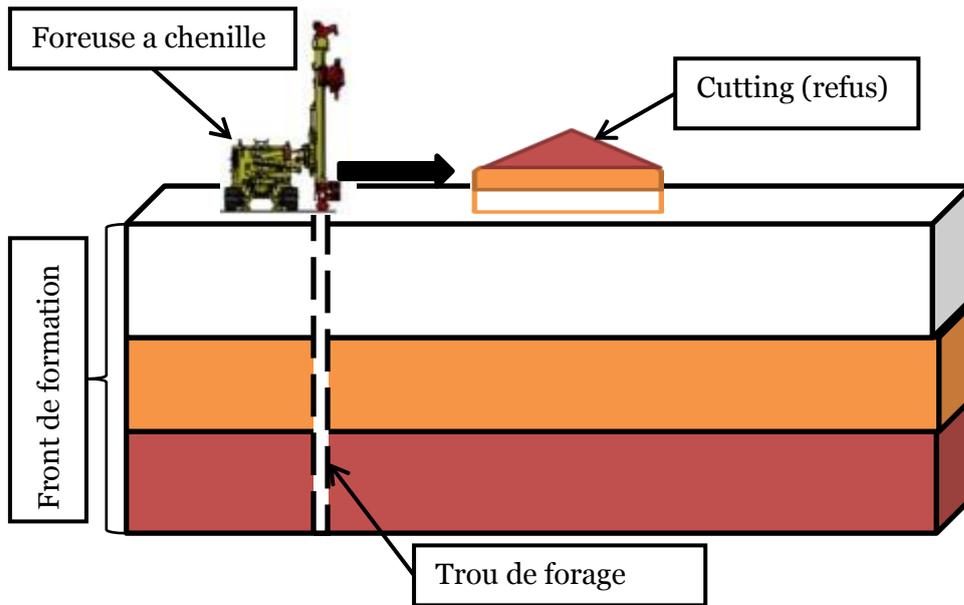


Figure26: Schéma de la section verticale d'un gradin et la superposition inverse au niveau du cutting (pyramide des produits du forage)

Conclusion :

Dans cette étude, les matériaux carbonatés des carrières de Mzoudia et Ighoud ont été le siège d'une étude géologique abordé de trois manières complémentaires : cette étude à débiter par des observations sur le terrain pour une caractérisation macroscopique des matériaux géologiques. Dans cette partie un échantillonnage ciblé a été fait sur les différents faciès (schistes et carbonates).en suite Les deux autre approches ont été abordé simultanément. Ainsi une quinzaine 'échantillons ont été analysés par la méthode de fluorescence X, et une dizaine lames minces ont été confectionnées pour une analyse microscopique

A la lumière des résultats obtenus par les études géochimiques et minéralogiques abordée par différentes techniques, nous pouvons conclure sur certains points et perspectives qui pourraient améliorer la qualité du ciment de l'usine CIMAR- Marrakech, par l'optimisation des matériaux de la carrière d'une part, et afin de diminuer la consommation thermiques au niveau du four tout en contrôlant la quantité des matériaux quartzitiques consommés d'autre part.

L'analyse microscopiques des lames et les résultats de la géochimie des calcaires et des schistes de la carrière de M'zoudia, à permet de mettre en évidence une variation aussi bien verticale que latérale des faciès à différents échelles. Cette variation est tantôt minéralogique tantôt chimiques. Pour répondre aux objectifs fixés au début de ce mémoire c'est dire la caractérisation de matériaux premiers du ciment au niveau de la carrière de M'zoudia, de distinguer avec précision les zones potentielles de localisation des matériaux non nuisible et qui vont optimiser la qualité du ciment de l'usine CIMAR de Marrakech.

nous concluons notre études sur les faits que :

- Les schistes inférieurs noirs de la zone 2, gradin 6, coté gauche (échantillon Si r2) et ceux de l'arrière zone 1 (échantillon Si r4) sont généralement quartzitiques dont le taux de quartz atteint 55,8% pour l'échantillon Si r2 et 70,2% pour échantillon Si r4. Ce taux du quartz est très nuisible à l'exploitation.
- Les schistes inférieurs de la zone 5, gradin 1, coté gauche (échantillon Si r1) ainsi que ceux de la zone 2, gradin 5, coté gauche (échantillon Si r3) sont utiles pour l'exploitation car ils sont très pauvres en du quartz(8%.)
- Les calcaires dolomitiques de la zone 5, gradin 1, coté droit (échantillon Cdr1), bien que pauvres en quartz contiennent des teneurs très variables de dolomite et par conséquent la magnésie est présente, et il est à éviter puisque cette échantillon représentatifs contient 8% de MgO, alors que la norme doit inférieur à4%.
- Les marnes de la zone 5, gradin 1, coté droit (échantillon Mr1) et ceux de la zone 1, gradin 5, coté gauche (échantillon Mr2) et les calcaires marneux de la zone 1, gradin 6, coté gauche (échantillon Cmr1) et ceux de la zone 5, gradin 1, coté droit (échantillon Cmr2) peuvent êtres utilisés pour compenser le besoin de silice vu qu'ils contiennent un faible taux du quartz. Ces échantillons sont respectivement:

Mr1 : 36% SiO₂, dont 4% est sous forme de quartz (observé en lame minces)

Mr2 : 39% SiO₂, (lame mince non confectionnée)

Cmr1 : 33% SiO₂, dont 0,8% est sous forme de quartz (observé en lames mince)

Cmr2 : 18% SiO₂, dont 2,6% est sous forme de quartz (observé en lames mince).

Perspectives :

Afin de mieux connaître la carrière de Mzoudia, nous suggérons:

- Pour le choix de la matière première, introduire une analyse minéralogique car les analyses chimiques seules sont insuffisantes, vu l'abondance et la variabilité des teneurs en minéraux impropres à l'exploitation tels que le quartz et la dolomite.
- Faire des analyses minéralogiques plus poussées en utilisant des techniques plus précises telles que la diffraction des rayons X, la spectroscopie d'absorption infrarouge, et l'ICP qui donnent des teneurs exactes des différentes phases minéralogiques.
- Faire des analyses par l'Alizarine aux calcaires dolomitiques pour bien déterminer le taux de dolomite vu la difficulté de la distinguer de la calcite au microscopique.
- Utiliser la calcimétrie pour estimer le pourcentage de CaCO₃ et MgCa(CO₃)₂ pour les calcaires et les calcaires dolomitiques.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Bayane L. et Moussounda L. (2004) Etude de l'impact des quartzites sur l'évolution du calcaire en profondeur dans la zone 2 du gisement de M'zoudia – *Mémoire de stage de fin d'étude de maîtrise de métallogénie, FST Marrakech.*

Dairou A. ADAMA et Victor Aristide M. (2007) Détermination du taux de quartz dans les matériaux de carrier de M'zoudia. *Mémoire de stage de fin d'étude de maîtrise de métallogénie, FST Marrakech.*

Documents internes de la société CIMAR de Marrakech.

Fatouma O. et Ouabbas A. (2005) Identification et évaluation des matériaux de la découverte dans la zone 2 de la région de M'zoudia de janvier 2006 au décembre 2010. *Mémoire de stage de fin d'étude de maîtrise de métallogénie, FST Marrakech.*

Hervé Coulon (1987) Propriété physico chimique de sédiments argileux français : contribution au stockage de déchets radioactifs- *Thèse présenté à l'UST de Lille Flandres- Artois.*

Najih S. et Mouhati H. (2002) Etude lithologique et interprétation des sondages de carrière – *Mémoire de stage de fin d'étude de maîtrise de métallogénie, FST Marrakech.*

Sylla A. et Cissé I. (2003) Interprétation des sondages carottés de la zone 2 de M'zoudia et établissement d'un programme d'exploitation sur 3 ans. *Mémoire de stage de fin d'étude de maitrise de métallogénie, FST Marrakech.*

Tahiri A (1982) Lithostratigraphie, structure et métamorphisme de la partie sud des Jebilet occidentales autochtones et allochtones. Thèse 3e cycle Univ. Aix-Marseille III,

Tahiri A (1983) Lithostratigraphie et structure du jbel Ardouz - Maroc hercynien. Bull. Inst. Sei. Rabat, n° 7, p.1-16.