

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

*République Algérienne Démocratique et Populaire*

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Constantine 1



جامعة قسنطينة 1

Faculté des Sciences de la Terre, de la  
Géographie et de l'Aménagement du Territoire

كلية علوم الأرض، الجغرافيا  
والتهيئة العمرانية

دائرة العلوم الجيولوجية

Dpt Sciences géologiques

N° Série.....

Code.....

**ETUDE GEOLOGIQUE ET MINIERE DE QUELQUES ROCHES  
INDUSTRIELLES.  
CAS D'APPLICATIONS DANS LE NORD-EST ALGERIEN.**

**THESE DE DOCTORAT EN SCIENCES  
OPTION : GEOLOGIE .MINIERE**

**Par Mohammed BOUREZG**

Soutenue le.....

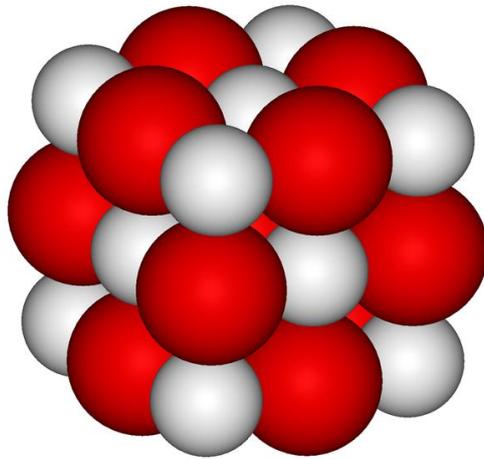
**Jury**

Mr BENABBAS Ch.  
Mr KOLLI O.  
Mr BENALI H.  
Mr SERRAR M.C.  
Mr BOUREFIS A.

Professeur  
Professeur  
Professeur  
Professeur  
Professeur

Président  
Promoteur  
Examineur  
Examineur  
Examineur

**ÉTUDE GEOLOGIQUE ET MINIERE DE  
QUELQUES ROCHES INDUSTRIELLES  
CAS D'APPLICATIONS DANS LE NORD-EST  
ALGERIEN**



**CRISTAL DE CaO**

## SOMMAIRE

<b>PREAMBULE.....</b>	<b>7</b>
<b>1<sup>ERE</sup> PARTIE.....</b>	<b>9</b>
<b>CHAPITRE 1 : GENERALITES .....</b>	<b>10</b>
<b>1.1. INTRODUCTION .....</b>	<b>10</b>
1.1.1. Historique d'utilisation de la chaux.....	10
1.1.2. Etat des études et publications.....	12
1.1.2.1. Dans le domaine des carbonates naturels.....	12
1.1.2.2. Dans le domaine de la géologie locale.....	12
<b>1.2. FORMATION, PROPRIETES DES CARBONATES .....</b>	<b>13</b>
1.2.1. Généralités sur les sédiments carbonatés .....	13
1.2.2. Formation des roches carbonatées sédimentaires .....	14
1.2.3. Minéralogie des roches carbonatées : .....	16
1.2.4. Classification des roches carbonatées .....	16
1.2.5. Caractères principaux des calcaires et dolomies .....	18
1.2.5.1. Roches crues .....	18
1.2.5.2. Conditions préalables à la transformation des carbonates naturels en chaux.....	20
<b>CHAPITRE 2 : METHODES D'ETUDE.....</b>	<b>22</b>
<b>2.1. Collecte et étude de documentation .....</b>	<b>22</b>
<b>2.2. Activité de terrain.....</b>	<b>22</b>
<b>2.3. Préparation et traitement des échantillons .....</b>	<b>23</b>
<b>2.4. Essais et analyses réalisés par le laboratoire de l'entreprise LHOIST (Belgique) .....</b>	<b>23</b>
<b>2.5. Visites d'usines .....</b>	<b>24</b>
<b>2.6. Visites de laboratoires .....</b>	<b>24</b>
2.6.1. Laboratoire central de l'entreprise Lhoist (Belgique). .....	24
2.6.2. Laboratoire national de l'ENG (Oum Settas, El Khroub). .....	24
<b>2.7. Traitement des données.....</b>	<b>25</b>
<b>CHAPITRE 3 : LA CHAUX, DEFINITIONS, PROPRIETES .....</b>	<b>26</b>
<b>3.1. Définitions, nomenclature .....</b>	<b>26</b>
<b>3.2. Propriétés physico-chimiques des chaux aériennes .....</b>	<b>28</b>
3.2.1. Réactivité à l'eau et extinction de la chaux vive : .....	28

3.2.2.	Structures cristallines : .....	30
3.2.3.	Poids spécifique et densités : .....	31
3.2.4.	Solubilité et pH : .....	32
3.2.5.	Floculation, réactions pouzzolaniques : .....	33
<b>3.3.</b>	<b>Autres propriétés : .....</b>	<b>33</b>
<b>3.4.</b>	<b>Caractérisations des chaux aériennes .....</b>	<b>33</b>
3.4.1.	Spécificités des chaux dolomitiques - réactions fondamentales : .....	34
3.4.2.	Autres réactions des chaux dolomitiques .....	37
<b>3.5.</b>	<b>Fabrication industrielle de la chaux .....</b>	<b>37</b>
3.5.1.	Généralités .....	37
3.5.2.	Etapas de la fabrication .....	37
3.5.3.	Les fours à chaux .....	38
3.5.4.	Conditionnement de la chaux .....	42
3.5.5.	Contrôles qualité .....	44

## **CHAPITRE 4 QUELQUES SPECIFICATIONS D'USAGE ET APPLICATIONS DES CARBONATES..... 45**

<b>4.1.</b>	<b>Cas des calcaires et dolomies crus .....</b>	<b>45</b>
<b>4.2.</b>	<b>Cas des granulats .....</b>	<b>47</b>
4.2.1.	Quelques spécifications .....	47
4.2.2.	Autres caractéristiques .....	51
<b>4.3.</b>	<b>Cas des carbonates finement fragmentés et leurs applications .....</b>	<b>51</b>
<b>4.4.</b>	<b>Utilisations de la chaux.....</b>	<b>52</b>
4.4.1.	En sidérurgie .....	52
4.4.2.	En métallurgie (métaux non ferreux) .....	52
4.4.3.	Pour la protection de l'environnement.....	53
4.4.4.	Dans le domaine des fumées industrielles.....	55
4.4.5.	Dans l'agriculture .....	55
4.4.6.	Dans les constructions et les routes .....	56
4.4.7.	Autres utilisations .....	56
4.4.8.	Données utilitaires .....	58

## **CHAPITRE 5: CARBONATES NATURELS, CHAUX : ECONOMIE..... 61**

<b>5.1.</b>	<b>Données de base, production mondiale .....</b>	<b>61</b>
5.1.1.	Autres spécificités : .....	63
5.1.2.	Données récentes sur la production mondiale de chaux : .....	64
<b>5.2.</b>	<b>Production algérienne de carbonates de calcium et de chaux: .....</b>	<b>65</b>

## **2<sup>NDE</sup> PARTIE..... 68**

**CHAPITRE 6 : GEOLOGIE REGIONALE ..... 69**

<b>6.1. Structuration géologique d'ensemble.....</b>	<b>69</b>
<b>6.2. Les formations du NE algérien (Fig.VI.2)) .....</b>	<b>71</b>
6.2.1. Les zones internes .....	71
6.2.1.1. le socle kabyle,.....	71
6.2.1.2. la couverture sédimentaire .....	72
6.2.2. La zone médiane ou domaine des flyschs.....	72
6.2.2.1. Les flyschs maurétaniens .....	73
6.2.2.2. les flyschs massyliens :.....	73
6.2.2.3. les flyschs numidiens : .....	73
6.2.3. La zone « prékabyle » :.....	74
6.2.4. Les zones externes ou <i>domaine tellien</i> .....	74
6.2.4.1. les nappes ultra-telliennes (Durand-Delga, 1969) .....	74
6.2.4.2. les nappes telliennes sensu-stricto,.....	74
6.2.4.3. La nappe péni-tellienne et les unités méridionales à nummulites, .....	74
6.2.4.4. La nappe néritique constantinoise .....	75
6.2.4.5. Les séries de l'avant pays sétifien (Farah, 1991) .....	75
6.2.4.6. Le parautochtone nord-aurésien (Farah, 1991).....	76
6.2.4.7. l'autochtone nord-aurésien (Farah, 1991).....	76

**CHAPITRE 7: GEOLOGIE DES SECTEURS ETUDIES..... 77**

<b>7.1. Le domaine Prékabyle (Deleau, 1937, Raoult, 1974 ; Vila, 1980).....</b>	<b>77</b>
7.1.1. Lithostratigraphie (Fig. VII. 3).....	78
7.1.1.1. Au paléozoïque .....	78
7.1.1.2. VII.1-1-2) - Au jurassique .....	78
7.1.1.3. Au Crétacé (Fig. VII.3). .....	79
7.1.1.4. Au Tertiaire .....	80
7.1.2. Tectonique et paléogéographie : (Fig. VII. 4) .....	81
<b>7.2. Le domaine néritique constantinois .....</b>	<b>82</b>
7.2.1. Lithostratigraphie.....	83
7.2.1.1. Le Trias et le Jurassique .....	84
7.2.1.2. Le Crétacé .....	87
7.2.1.3. Le Paléogène.....	89
7.2.1.4. Le Néogène, avec :.....	90
7.2.2. Données structurales et paléogéographiques .....	90
7.2.2.1. Les évènements structuraux majeurs (Vila, 1980 ; Aris, 1994).....	90
7.2.2.2. Reconstitution paléogéographique : (Aris, 1994) .....	91

**CHAPITRE 8 : DONNEES SUR LES CARRIERES ETUDIEES ..... 93**

<b>8.1. Considérations préliminaires.....</b>	<b>93</b>
<b>8.2. Carrières de calcaire la série du Safia.....</b>	<b>94</b>
8.2.1. Carrière de calcaire de DJENDEL– Oued Noukhal (Arcelor-Mittal) .....	94

8.2.1.1.	Localisation, historique.....	94
8.2.1.2.	Aperçu géologique du site (Fig. VIII. 2).....	95
8.2.1.3.	Résultats des prospections antérieures :.....	97
8.2.2.	Carrière de calcaire de BEN AZZOUZ- Si Messaoud (ENG).....	98
8.2.2.1.	Localisation, historique.....	98
8.2.2.2.	Aperçu géologique du site.....	100
8.2.2.3.	Résultats des Prospections antérieures.....	103
<b>8.3.</b>	<b>Carrières de la série néritique constantinoise.....</b>	<b>105</b>
8.3.1.	Carrière de calcaire de l'Oum Settas (El Khroub.....	105
8.3.1.1.	Localisation – historique.....	105
8.3.1.2.	Aperçu géologique du massif de l'Oum Settas(Fig.VIII. 11).....	105
8.3.1.3.	Résultats des travaux de recherche antérieurs.....	108
8.3.1.4.	Etat actuel de la carrière.....	115
8.3.2.	Carrière de dolomie de Téioualt (Aïn M'lila).....	116
8.3.2.1.	Localisation, historique.....	116
8.3.2.2.	Données géologiques locales (Figure VIII.22).....	116
8.3.2.3.	Résultats des recherches antérieures.....	119
<b>3EME PARTIE.....</b>	<b>.....</b>	<b>121</b>
<b>CHAPITRE 9 MISE EN ŒUVRE.....</b>	<b>.....</b>	<b>122</b>
<b>9.1. Applications aux calcaires de la carrière de DJENDEL (Oued N'Khal, Arcelor-Mittal). .....</b>	<b>.....</b>	<b>122</b>
9.1.1.	Etat de la carrière en 2011.....	122
9.1.2.	Echantillonnage et examen des échantillons.....	123
9.1.3.	Résultats des analyses et traitement statistique.....	124
<b>9.2. Applications aux calcaires de la carrière de Ben Azzouz (Si Messaoud).....</b>	<b>.....</b>	<b>126</b>
9.2.1.	Etat de la carrière en 2011 (Photo IX.5 ; IX.6).....	126
9.2.2.	Echantillonnage et description des échantillons :.....	127
<b>9.3. Applications aux Carrière de calcaire de l'Oum Settas- (El Khroub- Constantine, ENG).....</b>	<b>.....</b>	<b>130</b>
9.3.1.	Etat de la carrière au moment de l'échantillonnage (2007).....	130
9.3.2.	Echantillonnage, examen des échantillons.....	130
9.3.3.	Analyses chimiques, traitement statistique et interprétation.....	137
9.3.3.1.	Traitement des données chimiques.....	138
9.3.3.2.	Interprétations.....	138
<b>9.4. Applications à la Carrière de dolomie de TEIOUALT.....</b>	<b>.....</b>	<b>140</b>
9.4.1.	Etat de la carrière au moment de l'échantillonnage (2007- 2008).....	140
9.4.2.	Echantillonnage, examen des échantillons et interprétation.....	142
9.4.3.	Analyses chimiques, traitement des données et interprétation.....	147
<b>CHAPITRE 10. ANALYSES, TESTS ET ESSAIS DE CUISSON. CAS D'APPLICATION ....</b>	<b>.....</b>	<b>149</b>
<b>10.1. Analyses thermiques (ATG et ATD). Cas de Téioualt.....</b>	<b>.....</b>	<b>149</b>

<b>10.2. Tests d'essais physiques sur calcaires de DJENDEL et du KHROUB .....</b>	<b>151</b>
10.2.1. Préparation des composites, types d'essais .....	152
10.2.2. Analyses chimiques des échantillons composites ANB 19, ANB 20 et ANB 67 .....	152
10.2.3. Coefficient d'absorption d'eau (WA) .....	153
10.2.4. Tests de porosité et de masse volumique apparente des calcaires.....	154
10.2.5. Réactivité à l'eau de la chaux vive.....	154
<b>10.3. Tests de cuisson sur calcaires de DJENDEL et du KHROUB.....</b>	<b>156</b>
10.3.1. <i>Test de réactivité</i> .....	156
10.3.2. Indices de « production de fines » à différentes températures.....	157
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>161</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>164</b>
<b>ANNEXES .....</b>	

## PREAMBULE

Parmi les géomatériaux, le calcaire et à un degré moindre la dolomie ainsi que les chaux qui en dérivent occupent une place prépondérante dans diverses activités de la vie courante en raison des nombreuses applications qu'ils permettent. Si de tels matériaux sont connus et surtout utilisés depuis longtemps dans le secteur de la construction; l'industrie de la chaux quant à elle, s'est considérablement développée ces derniers temps, résultat d'une meilleure connaissance de ce produit aux qualités innombrables...

Renforcer sa production en Algérie pourra devenir indispensable dans une politique de développement durable car son usage plus ou moins étendu concernera beaucoup de domaines vitaux en agriculture, dans ceux de l'environnement et dans une multitude de secteurs industriels.

Plusieurs raisons sont favorables à cette optique :

Le pays ne produit qu'une à deux variétés de chaux destinées à couvrir à peine les besoins actuels de la sidérurgie alors qu'il dispose de ressources naturelles suffisantes voire abondantes notamment dans sa région *nord-est*. Ces ressources, sont affleurantes, donc faciles à extraire, mais nécessitent pour la plupart des cas un complément d'investigations afin de mieux les valoriser.

Toutefois, la production ne sera envisageable qu'après étude technico- économique conduite avec la plus grande rigueur, car le produit est à faible valeur ajoutée et de plus, il est pondérable. Comme le ciment, la chaux courante est un produit destiné à la consommation locale, à utiliser aussi près que possible de son lieu de fabrication pour ne pas avoir à subir les surcoûts occasionnés par des livraisons lointaines. Ces inconvénients, à prendre en compte, ne pèsent pas devant les avantages que procurera ce produit à la fois ancien et d'avenir.

L'expérience, même maigre, acquise en Algérie à ce jour dans le domaine de la transformation du calcaire et de la dolomie en chaux, constitue un capital non négligeable pour le renforcement de ce secteur d'activité appelé à se développer.

La technologie de fabrication de la chaux a beaucoup évolué dans les pays avancés. Il est possible de trouver sur le marché des qualités de chaux très élaborées, répondant à des applications de plus en plus fines. Mais pour les variétés de base, cette technologie, voisine de celle des ciments, reste maîtrisable. C'est de tels produits qu'il faudra viser dans un premier temps. De plus, par effet d'entraînement, l'activité est pourvoyeuse de main d'œuvre...

Dans le cadre de cette étude, quatre carrières sont choisies. Leurs matériaux sont testés et servent même, pour la plupart, de matières premières à la fabrication actuelle de chaux. C'est

avec des exploitations aux qualités similaires mais comportant des potentialités encore plus appréciables que de nouvelles applications industrielles peuvent être envisagées...

Au départ, calcaire, dolomie et chaux sont examinés sous divers aspects les caractérisant, avec en rappel quelques titres de publications et ouvrages consacrés. L'accent sera particulièrement mis sur le contexte géologique, aussi bien général que régional et local, point de départ fondamental à l'étude de ces substances. L'aspect économique, le marché de tels géomatériaux sera succinctement abordé dans le cadre de cette contribution.

Quelques données obtenues à partir de chacun des sites retenus, de leurs matériaux respectifs sont traitées aux fins de caractérisations diverses. Ce qui pourra aider à mieux les connaître sur le plan qualitatif et à servir de modèles à d'éventuelles projections de réalisation. Produire de tels matériaux et répondre aux besoins d'un marché appelé à plus d'expansion, c'est aller dans la perspective d'un développement économique durable.

## **1<sup>ère</sup> PARTIE**

# CHAPITRE 1 : GENERALITES

## 1.1. INTRODUCTION

### 1.1.1. Historique d'utilisation de la chaux

Le calcaire et la dolomie, ces roches sédimentaires carbonatées utilisées pour bâtir divers ouvrages, édifier des remparts ou des barrages, mettre en place des enrochements ou encore pour fabriquer de nombreux objets dont des outils, des armes...sont aussi à l'origine de la chaux... Leur usage indifférencié remonte à l'âge de la Pierre.

La chaux dont la découverte, fortuite, à partir de ces matériaux surchauffés et soumis à l'action immédiate de l'eau (de la pluie sans doute au départ), est venue plus tard. Il s'agit d'une sorte de mastic blanchâtre et pâteux qui n'était autre que de la chaux éteinte! (*Boyton-1980*) Elle a servi comme enduit et comme liant dans les constructions. Elle peut être considérée comme le précurseur des plâtres et ciments de nos jours.

Quoique très ancienne par son utilisation, il est difficile d'établir une chronologie linéaire de son évolution à travers les âges. En Syrie, dans des sites archéologiques du début du 6eme millénaire avant notre ère, des vestiges ont contenu de la vaisselle blanche de chaux et parmi les ruines, des pans de murs étaient chaulés (*Martinet et Souchu - 2009*).

Les égyptiens aussi ont utilisé la chaux, il y a de cela plus de 6000 ans. Elle a d'ailleurs servi comme mortier pour lier les gros blocs de calcaire constituant les pyramides.

L'héritage de cette civilisation se retrouva en Grèce où la chaux connut beaucoup d'applications dans les constructions. Les grecs l'utilisèrent, pas seulement dans ce domaine, mais aussi comme réactif chimique.

Un peu plus tard, les romains construisirent les premiers fours pour la fabriquer par calcination. A Rome, elle connut même des applications médicales en solution dans l'eau. Elle servait aussi pour l'assainissement des terres agricoles ou pour assécher les terrains humides et sceller des pierres en sol.

D'autres civilisations antiques sans relation avec les égyptiens ou les romains comme celles des incas ou des mayas utilisaient, il y a près de 5000 ans, divers mortiers en chaux. Certains étaient curieusement préparés à l'aide de chaux éteinte, d'orge hydratée, de sable ou même de sang animal! (*Claude-1994*).

La durabilité des ouvrages réalisés grâce à cette chaux ou à ses mortiers reste liée à la mise en œuvre et au bon dosage des ingrédients incorporés.

Les usages de la chaux mis en place par les romains se sont prolongés dans l'histoire jusqu'au-delà du moyen âge chrétien, en se diversifiant, s'améliorant techniquement mais restant symboliques de l'époque. L'exceptionnelle qualité des mortiers des édifices romains qui ont traversé le temps jusqu'à la renaissance en occident, a fait naître - à cette époque - la légende d'adjonctions secrètes au mortier de chaux (*Martinet, Souchu-2009*). Ces usages ont toutefois largement précédé la connaissance rationnelle des mécanismes de sa fabrication et de sa prise.

Il n'y a pas longtemps, plus près de nous, dans différents endroits du nord comme du sud algérien, la chaux fut produite dans des fours traditionnels près de Constantine (Chettaba, Hamma Bouziane) et commercialisée dans cette ville jusque dans les années 2000. De même à Ghardaïa dans le M'zab. Elle fut beaucoup utilisée pour l'assainissement, comme charge pour les peintures à eau traditionnelles (« Nila » ou peinture à l'eau, bleue, utilisée dans les vieux quartiers de Constantine et d'autres villes) et dans le domaine de la construction...

L'approche scientifique et l'exploitation industrielle de la chaux ne débuta réellement qu'à partir du XVIII<sup>e</sup> siècle. L'anglais Black et le français Lavoisier (*Claude-1994*) furent parmi les premiers à décrire les réactions advenant pendant sa fabrication dont le dégagement de gaz carbonique.

Il est important de noter qu'à cette époque et même au delà de 1791 le terme chaux doit être pris dans son sens large car pouvant provenir de calcaire pur ou, plus ou moins dolomitique ou carrément de dolomie. Pour ce dernier matériau, (*Bourrouilh Le Jan-1996*) dresse un historique assez exhaustif sur son origine, ses usages...

Jusqu'au XIX<sup>e</sup> siècle, ce sont donc les savoirs empiriques qui ont guidé les pratiques des chauxfourniers, bâtisseurs et autres artisans. C'est durant cette période que les savants Vicat, Debray et Le Chatelier (*Claude-1994*) complèteront leurs travaux, en déterminant toutes les données physico-chimiques du produit et en décrivant différents processus et usages possibles.

C'est sans doute grâce au développement considérable de la sidérurgie, qu'au début du XX<sup>e</sup> siècle, apparurent pour les besoins de cette industrie, de gros centres de production de chaux, aux Etats Unis et en Europe notamment.

Depuis un siècle, les bases scientifiques et industrielles modernes de la production et des usages de la chaux se sont progressivement mises en place. Elles sont affinées, précisées, multipliées et adaptées à de nouveaux besoins dans la conception et les utilisations du produit.

La chaux apparait aujourd'hui comme l'élément fondamental d'une gamme toujours plus étendue d'applications industrielles débordant largement le secteur des géomatériaux. Ses propriétés et qualités d'usage sont déclinées en fonction de chacune d'elles de façon toujours plus précise et adaptée. Cette spécialisation est le résultat de recherches associées à la longue expérience acquise par les gros producteurs de ce secteur (monde occidental, Chine, Japon, Russie...).

## 1.1.2. Etat des études et publications

### 1.1.2.1. Dans le domaine des carbonates naturels

Deux approches sont proposées, à titre indicatif. Elles ne sauraient être exhaustives car des omissions, forcément involontaires, seront sans doute commises. Le but poursuivi est seulement d'orienter vers des lectures en relation avec le thème étudié...

L'une d'elles se rapporte aux carbonates naturels en tant qu'entités géologiques, examinés sous tous les aspects induits par cette importante discipline scientifique. Elle englobe les données pétrographiques, minéralogiques, paléontologiques, sédimentologiques...de ces formations, de leur évolution spatio-temporelle...Quelques auteurs et des ouvrages de référence sont cités en bibliographie. Les travaux de *Bathurst* (1975); *Tucker et Wright* (1990)... en sont des exemples.

L'autre approche est plus tournée vers les applications, plaçant les carbonates parmi les géomatériaux et à l'amont d'applications dans divers domaines industriels. La documentation est relativement abondante, appuyée par des revues professionnelles, des brochures et articles spécialisés émanant de chercheurs universitaires ou affiliés aux grands producteurs sectoriels (*Lhoist, Carmeuse...*). Retenons là aussi quelques auteurs comme *Boyton* (1980); *Oates* (1998) et beaucoup d'autres, publiant seuls ou en collaboration, ayant pour la plupart contribué dans des revues spécialisées telles que *Industrial Minerals*...

### 1.1.2.2. Dans le domaine de la géologie locale

Mis à part le secteur des granulats, le domaine des géomatériaux est relativement nouveau. La documentation est rare en Algérie. Sans doute que des traditions de publications restent à établir ici.

En ce qui concerne la géologie algérienne, l'on retient quelques publications notamment celle de la région constantinoise. Les plus en vue concernent les travaux de cartographie entrepris par l'école hollandaise dès 1964 (*Raven* au Khroub, *Van de Fliert* à Oued Athménia, *Bär* à Aïn M'lila, *Voute* à Aïn Fakroun...(cités par *Vila*) et par les géologues de la S.N. REPAL (société française de pétrole des années 60) notamment dans le cadre du permis de recherche appelé permis de Constantine. En parallèle, d'autres études ont été menées par l'école française sous la direction de M. *Durand-Delga* dans le nord et le nord-est constantinois par MM. *Raoult, Bouillin, Vila* entre autres, dans le cadre de levés réguliers au 1/50000. La carte géologique de Azzaba (ex Jemappes) au 1/50000°, œuvre de *Deleau* (1937), ne couvre qu'une partie des massifs du Safia, l'autre partie appartient à la feuille de Filfila, non encore achevée...

Un peu plus tard, les travaux successifs de *Vila*, s'appuyant sur les synthèses de M. *Kieken* (1960, 1962) et de M. *Durand-Delga* (1969). Les explorations géologiques étaient réalisées pour la SONATRACH par une équipe de géologues composée de *Basseto, Gonnard, Guellal, Paris* et la collaboration de l'université de Constantine (*Coiffait, Lahondère, Vila...*). Elles ont

permis une synthèse géologique relativement récente concernant l'ensemble de la chaîne alpine de l'Algérie orientale. Ce qui a amené les chercheurs à subdiviser la région en plusieurs zones suivant leurs natures lithologiques et leurs situations structurales respectives.

La thèse de doctorat de *Vila* (1980), relativement plus récente, présente les principaux résultats enregistrés sur l'ensemble de la chaîne alpine d'Algérie nord orientale, basée sur une synthèse d'abondantes sources de documentation. D'autres travaux plus récents dont une synthèse due à *Wildi* (1983) ainsi que de nombreuses thèses et publications d'universitaires nationaux sont consacrées à des aires géologiques plus ou moins limitées de cette région. Tous ces auteurs, que je ne saurai citer ici, avec le concours de Sonatrach, ont contribué à enrichir la base encore lacunaire des données géologiques autant régionales que nationales.

Par ailleurs, d'autres travaux de recherche sur les potentialités minières y compris sur les carbonates ont été dirigés depuis 1966 par la SONAREM [Société Algérienne de Recherche et d'Exploitation Minière, qui donnera naissance plus tard à l'ONIG (Office de l'Information Géologique) remplacé aujourd'hui par l'ORGM (Office de Recherche Géologique et Minière)] avec au départ l'appui de géologues venant surtout d'Europe de l'est. La documentation y est très peu éditée voire inédite.

Depuis 2001, deux organismes : l'ANGCM (Agence Nationale de la géologie et du Contrôle Minier) et L'ANPM (Agence Nationale du Patrimoine Minier) pilotent avec l'ORGM le secteur minier auquel les carbonates naturels sont affiliés notamment en ce qui concerne l'octroi de permis de recherche, d'exploitation, de contrôle et autres opportunités d'investissement dans le secteur. Beaucoup d'exploitants, petites entreprises pour la plupart, se partagent les carrières de carbonates surtout pour produire des granulats. Parmi ces exploitants, privés pour la majorité, figurent quelques entreprises publiques dont ALGRAN (Algérienne des Granulats, filiale de l'entreprise des non-ferreux : ENOF) et surtout ENG (Entreprise Nationale des Granulats) qui produit aussi des poudres de carbonates.

## **1.2. FORMATION, PROPRIETES DES CARBONATES**

### **1.2.1. Généralités sur les sédiments carbonatés**

Les calcaires et les dolomies forment la majorité des roches carbonatées qui représentent environ 20% des ensembles sédimentaires. Elles sont composées de plus de 50% en poids de calcium (Ca) et de magnésium (Mg). Ces roches ont des éléments constitutifs qui se sont accumulés à la surface de la croûte terrestre et plus particulièrement dans les eaux, surtout marines. Les différents types de milieux marins vont produire des sédiments aux caractéristiques très variées telles que : lagune boueuse et sur-salée, récif corallien, dépôts de mer profonde, plage sableuse...

Les sédiments carbonatés se sont bien souvent transformés après leur dépôt, rapidement, par *diagenèse* à des températures (T) et pressions (P) relativement basses [T inférieure à 150°C et P inférieure à 1.5 Kilo-bar (Kbar)].

Cependant, ces roches carbonatées peuvent subir aussi des conditions de (T) et de (P) bien plus élevées au point d'atteindre divers degrés de métamorphisme. Ce qui les transformera en « *marbres* » montrant des recristallisations et l'apparition de minéraux caractéristiques.

Enfin, de très rares roches carbonatées ont une origine magmatique : ce sont les carbonatites...

Lorsqu'elles sont exposées aux conditions météoriques, les roches carbonatées subissent des altérations caractéristiques dont des dissolutions, liées notamment à leur solubilité élevée. Les phénomènes engendrés par ce type d'altération peuvent être regroupés sous le terme de « karstification ».

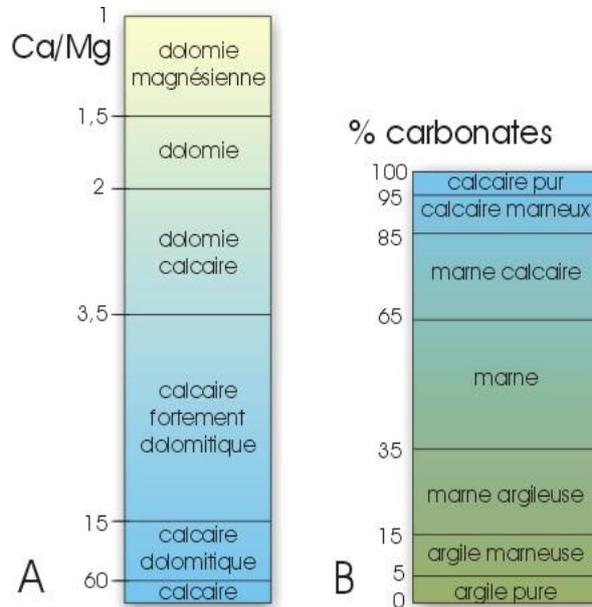
### 1.2.2. Formation des roches carbonatées sédimentaires

Le dépôt de sédiments calcaires est contrôlé par différents processus surtout de nature biogénique, souvent simultanés mais d'importance variable, (*Burnotte-1995*). Citons :

- l'apport de grains de carbonates formés ailleurs (Allochems) et transportés jusqu'à l'endroit du dépôt: fragments de roches calcaires (intraclastes), fragments d'organismes à squelette carbonaté (bioclastes : coquilles, foraminifères,...) boue calcaire (micrite), etc.
- l'action d'animaux fixes qui retiennent le calcium dans leur squelette et édifient des constructions (bioconstructions : cas des coraux, éponges, algues...) et autres phénomènes surtout observés dans les mers chaudes et peu profondes.
- La précipitation chimique en grains de taille variable : (oolites ou sphérules à couches concentriques, concrétions algaires, bactériennes, boues de cette origine...). Cette précipitation est souvent favorisée par la présence d'organismes qui modifient le pH ou la concentration de l'ion  $HCO_3^-$  et donc la solubilité de  $CaCO_3$ . Exemple des foraminifères planctoniques, des coccolithophoridés (à l'origine de la craie), des constructions algaires ou cyanobactériennes comme les stromatolites (*Claude, 1994*).
- L'apport de matériaux non carbonatés :
  - = soit détritiques (fragments solides issus de l'érosion d'autres roches : grains de quartz, de feldspath, boue composée de minéraux argileux),
  - = soit liés à une précipitation chimique (gypse, sel,...), eux même pouvant être encore d'origine biochimique (silice, hydrocarbures,...).

Dans tous les cas, le processus de formation de ces carbonates est au moins ponctuellement lié à la concentration et au dépôt de  $CaCO_3$  contenu et fixé à l'intérieur ou à l'extérieur des organismes par l'activité biologique. D'où le fait que les calcaires soient souvent fossilifères, surtout ceux formés en milieu marin (*König, 2006*)

Ces carbonates regroupent en général des calcaires francs, des calcaires dolomitiques et des dolomies voire des roches franchement magnésiennes. Lorsque l'on dispose d'analyses chimiques, on peut distinguer plusieurs termes en fonction du rapport Ca/Mg comme le montrent les diagrammes suivants (Fig.I.2-1).



**Fig. I.2-1-** Classification des roches carbonatées. **A**: en fonction du rapport Ca/Mg. **B** : en fonction de la teneur en argile. (Boulvain, 2011).

Les roches carbonatées peuvent aussi contenir de l'argile et former des calcaires marneux, des marnes, des marnes calcaires...

En général, un calcaire pur est relativement cassant, alors qu'une marne est plus friable. L'introduction d'argile dans le calcaire facilite aussi l'apparition de la schistosité et la formation de nodules diagénétiques.

Certains calcaires peuvent être durs, d'autres plus tendres comme les craies. Ces différences sont dues au degré de consolidation acquis lors de la diagenèse.

Cette lithification des carbonates induit souvent la cimentation des grains qui se sont accumulés, ce qui entraîne une réduction de la porosité et une cohésion plus grande de la roche. Un phénomène diagénétique fréquent est la *dolomitisation* des calcaires, par remplacement dans la structure de la calcite d'un atome de calcium sur deux par un atome de magnésium, ce qui entraîne la formation du minéral dolomite suivant la réaction :

$$2\text{CaCO}_3 + \text{Mg}^{++} \rightarrow \text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 + \text{Ca}^{++} \quad (1)$$

Le *Mg* est apporté par des eaux très minéralisées. Plusieurs hypothèses génétiques concernant les influences réciproques Ca-Mg sont apportées par les géologues. Si l'on peut distinguer à l'œil ou à la loupe sur cassure fraîche des calcaires grenus et des

calcaires fins, une analyse pétrographique sur lame mince est souvent nécessaire pour obtenir une bonne description de ces roches (*Boulvain, 2011*).

### 1.2.3. Minéralogie des roches carbonatées :

Les minéraux constitutifs les plus importants sont d'abord les carbonates (Voir aussi Chapitre III, figure III. 2) :

- La calcite :  $\text{CaCO}_3$ , elle cristallise dans le système rhomboédrique, densité : **2.71**, dureté : **3**, avec trois orientations de clivages très nets, éclat vitreux ou laiteux, couleurs variables. Nombreuses formes cristallines.
- L'aragonite :  $\text{CaCO}_3$ , cristallise dans le système orthorhombique, densité : **2.95**, dureté : **3.5 à 4** un clivage net, éclat vitreux, couleur variable. Cristaux souvent en agrégats fibreux.

*Remarque* : Dans les conditions de surface, la calcite, thermodynamiquement plus stable, est nettement plus abondante que l'aragonite.

- La dolomite (étymologiquement de *Dolomieu (Bourrouilh-le Jan, 1996)* :  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  cristallise dans le système rhomboédrique, densité **2.85**, dureté **3.5 à 4**, éclat vitreux ou laiteux, couleur variable souvent rosâtre ou jaunâtre, cristaux souvent rhomboédriques. Une solution solide complète existe avec l'ankérite  $\text{CaFe}(\text{CO}_3)_2$  qui est plus dense et souvent brunâtre. La dolomie réagit plus difficilement à l'acide chlorhydrique dilué (et chaud) que la calcite et l'aragonite.

Dans la littérature anglophone, le terme dolomite désigne indifféremment la roche ou le minéral. Pour la roche, nous lui préférons le terme « dolostone » qui équivaut à dolomie.

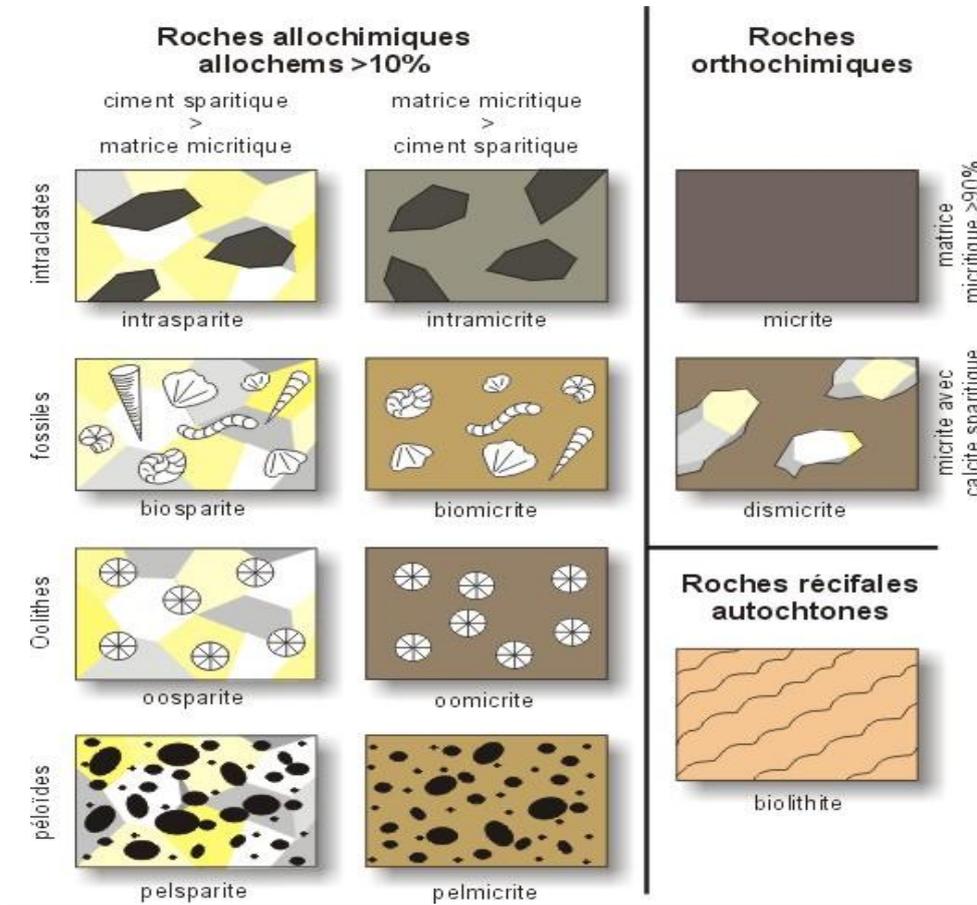
D'autres minéraux sont présents dans les roches carbonatées et sont la source des « impuretés » détectées par les analyses et *indésirables pour la fabrication des chaux*. Les plus importants sont : d'autres carbonates (sidérite :  $\text{FeCO}_3$ , rhodochrosite :  $\text{MnCO}_3$ ), des silicates (quartz, feldspaths, argiles : kaolinite, illite, chlorite, micas, amphiboles,...), des oxydes et hydroxydes (hématite, goethite, pyrolusite...), des sulfates (gypse, anhydrite,...), des sulfures (pyrite, marcassite,...), des phosphates (apatite)...

### 1.2.4. Classification des roches carbonatées

La diversité des calcaires et dolomies, liée à leurs compositions chimiques et minéralogiques, à leurs propriétés physiques telles que les porosités ainsi qu'à leurs textures, à la nature de leurs constituants...a fait naître une abondante terminologie. Actuellement les classifications les plus utilisées font appel à des paramètres accessibles sur échantillons ou en lame mince tels que proportion *matrice-ciment-grain*.

[Pour FOLK matrice ou micrite, ciment ou sparite et grain ou « allochems » regroupe : grains, corpuscules, éléments figurés]. Quoique plus ancienne, la classification de *Folk (1959)* reste

d'actualité et possède également ses adeptes (*Boulvain, 2011*). Elle est représentée en figure **I.2-2** :



**Fig.I.2-2** Schéma de classification des roches carbonatées selon Folk (1959). (*In Boulvain, 2011*)

Pour la plupart des sédimentologues la classification admise comme la plus commode est celle proposée par *Dunham* en 1962 et complétée par *Embry* et *Clovan* en 1972 puis par *Tsien* en 1981 ; elle est représentée en figure **I.2-3**.

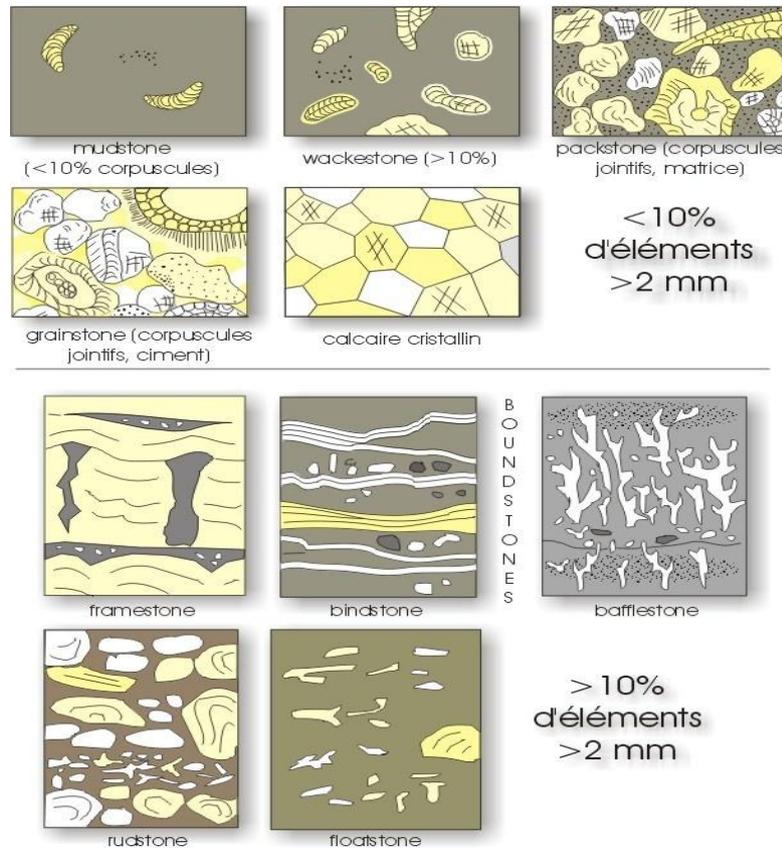


Fig. I.2-3- Classification des roches calcaires selon Dunham (1962) et Embry & Klovan (1972). (In *Boulvain, 2011*).

### 1.2.5. Caractères principaux des calcaires et dolomies

#### 1.2.5.1. Roches crues

##### a. Définition, perméabilité, porosité

- La *définition* des calcaires et dolomies inclut souvent leurs caractéristiques les plus facilement observables, c'est à dire la faible dureté [rayée au couteau mais variable d'un calcaire (ou dolomie) dur à une craie friable] et l'effervescence à l'acide chlorhydrique dilué pour le calcaire et l'absence de cette réaction vive pour la dolomie. Ces deux caractéristiques sont liées aux constituants majeurs de ces roches : la calcite et la dolomite.

Le calcaire et la dolomie sont des roches fissurables, souvent rigides mais cassantes, les mouvements qui les affectent les brisent et créent des fissures ou diaclases. L'eau s'infiltré facilement et circule par l'intermédiaire de ces fissures. Les paysages formés par ces roches sont souvent *perméables*.

- La *porosité* correspond au volume total des vides contenus dans la roche. Elle s'exprime le plus souvent en pourcentages. Dans un calcaire, celle-ci peut varier de 0 à 50%.

Alors que les fissures ou fractures sont des vides à *deux* dimensions, les pores sont des vides à *trois* dimensions. La porosité des pores est plutôt initiale mais elle peut se former lors d'une

phase diagénétique secondaire (dissolution). Cette porosité est mesurable en laboratoire pour les besoins d'applications dans le domaine des travaux publics et du bâtiment.

b. Classifications des porosités

Elles se font en fonction de :

- *la taille des pores* ; il y a plusieurs classifications, généralement trois classes de pores sont distinguées : les *nanopores* (ou *infrapores*), les *micropores* et les *macropores*. On dira par exemple : une forte macroporosité dans un calcaire indiquera un faible degré de cohésion entre les éléments, une forte microporosité ou infraporosité accessible à l'eau correspondra à un fort potentiel capillaire et sera une cause de gélivité...

- *la nature sédimento-diagénétique de la roche*.

Cette classification réalisée par Choquette et Pray en 1970 (in Boulvain, 2011), reste la référence. Elle est illustrée par la figure I.2-4 suivante :

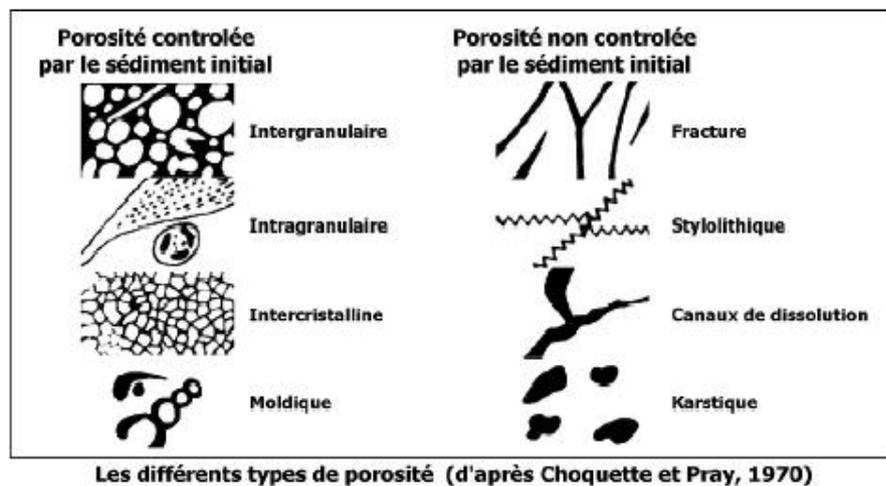


Fig. I.2-4- Représentation des types de porosité.

Elle différencie les porosités liées à la nature du calcaire : morphologie des grains, croissance des ciments..., des porosités indépendantes du ciment initial : fractures, karst... Toute une terminologie nuance les différents types de porosités : intergranulaires, intragranulaires, intercrystalines, styloolithiques, karstiques...

L'étude fine du microfaciès d'un calcaire et l'analyse de ses composants sédimentologiques et diagénétiques donnent de nombreuses indications qualitatives sur la porosité.

Les dolomies aussi font l'objet d'examen détaillés en relation avec les paramètres de perméabilité, de porosité et leurs variabilités.

*Paramètres qui, pour ces matériaux, ont une importance de premier ordre dans l'étude des aquifères et des réservoirs encaissants d'hydrocarbures ou de minéralisations métalliques.*

D'autres propriétés et caractères seront envisagés en rapport avec les principales utilisations de ces matériaux crus (bâtiments, travaux publics, carbonates...) ou transformés (liants dont la chaux et ses dérivés). Elles seront évoquées dans les parties appropriées.

c. Données chimiques

La dolomie ne fait pas effervescence avec l'acide chlorhydrique dilué et à froid (elle le fait un peu lorsque cet acide est chauffé à plus de 40°C), contrairement au calcaire. Ce dernier est très faiblement soluble dans l'eau pure [environ 15 à 20 mg par litre à 25°C mais soluble dans l'eau chargée de gaz carbonique (CO<sub>2</sub>)]. Ce gaz est d'autant plus soluble que la pression du milieu augmente (mais moins lorsque la température augmente, sauf si le calcaire est en présence d'acides générés par des végétaux!)...Conditions qui peuvent être réunies, expliquant certains phénomènes naturels comme les karsts ou autres jeux de dissolution-précipitation.

Les carbonates sont aussi connus pour leur *réactivité*, leur caractère fortement *basique*. Qualités somme toute appréciées, qui se répercutent favorablement sur les produits qui en dérivent comme les chaux.

**1.2.5.2. Conditions préalables à la transformation des carbonates naturels en chaux**

Les calcaires et les dolomies ne sont pas toujours utilisables s'ils ne répondent pas à des spécifications déterminées. Pour l'industrie des carbonates et de la chaux, ces spécifications sont plus rigoureuses que celles admises dans le génie civil ou le Bâtiment. Par exemple, l'on recherchera comme matière première les roches carbonatées *les plus pures chimiquement* et si possibles les plus calciques (pour les chaux calciques) ou les plus dolomitiques (pour les chaux magnésiennes) c'est-à-dire que les impuretés présentes dans les minéraux non carbonatés (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>...) sont à éviter au maximum. Idéalement, un calcaire pur composé uniquement de calcite (100% CaCO<sub>3</sub>) aurait comme composition chimique, (exprimée en oxydes) 56.0% CaO et 44.0% CO<sub>2</sub>. Une dolomie pure (100% de dolomite CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) aurait 30.4% CaO, 21.9% MgO et 47.7% CO<sub>2</sub>.

Suivant les applications, certains éléments sont à éviter, même à de faibles concentrations (*Claude, 1994*) :

- le soufre et le phosphore pour la sidérurgie
- le fer dans les applications où la couleur du produit a de l'importance (verre, gypse,...)
- les métaux lourds (applications environnementales, alimentation,...)

Chaque application préconise des limites de tolérance aux impuretés. Le tableau I.2-5 en donne des exemples pour la dolomie.

Utilisations	Spécifications sur la dolomie crue (wt %)					
	MgO	CaO	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Autres
Mg – métal	> 20	< 31	< 1.5	traces	traces	Zn, Mn
Magnésie (eau de mer)	> 20	< 31	< 0.2	< 0.3	< 0.1	–
Sidérurgie						
– Agglomération	> 18	> 28	< 2	< 1	< 1	S (< 0.050)
– Convertisseur	> 19	> 29	< 1.5	< 0.8	< 0.8	S (< 0.030)
Réfractaires	> 20	< 31	< 0.7	< 0.4	< 0.4	–
Charges (filler)	> 20	> 29	< 0.5	< 0.1	< 0.1	–
Agriculture	> 19	> 29	–	–	–	amiante
Verrerie	> 20	< 31	< 0.5	< 0.2	< 0.4	S, F, Cl

Rem. : Les valeurs ci-dessus sont données à titre indicatif. Les spécifications – produits sont en effet très variables suivant les pays, les utilisateurs, les disponibilités locales en dolomie  $\pm$  pure, etc.

Tab. I.2- 5- Applications de la dolomie – seuil de tolérance en impuretés, (in Lauwers 1992).

On recherchera aussi les roches les plus cohérentes, car après abatage et concassage il y a forcément production de « fines » qui sont indésirables lors de la cuisson. Cette proportion dépend en grande partie de la résistance mécanique de la roche... et les calcaires compacts et cohérents produiront moins de ces fines donc plus de « granulométries enfournables » que les calcaires tendres ou fragiles. La résistance à la compression du calcaire est souvent utilisée pour caractériser cette résistance mécanique. De grandes variations sont observées suivant les roches : elles vont de 10 à 190 méga Pascal (MPa) ...

Une propriété de certains calcaires cristallins est leur fragilisation par l'échauffement. Connue sous le nom de décrépitation, ce phénomène a aussi de l'influence sur l'efficacité du four et la solidité des chaux produites (chaux en roches d'application en sidérurgie). Les calcaires métamorphiques sont de ce fait moins propices (*Burnotte, 1995*)

La blancheur du calcaire, la surface spécifique (état de granulation)... sont des propriétés parfois spécifiées pour certaines applications. Elles dépendent du contenu minéralogique et/ou de la texture de la roche.

## CHAPITRE 2 : METHODES D'ETUDE

### 2.1. Collecte et étude de documentation

De nombreux documents, ayant rapport avec les carbonates naturels, leurs transformations en chaux, ont été consulté. Parmi ceux-ci, il y a des:

- cartes topographiques, cartes et rapports géologiques divers, comptes rendus de prospections, analyses et essais réalisés, rapports périodiques de production, articles, thèses...
- Ouvrages et articles divers sur les carbonates;
- Ouvrages et articles divers sur la chaux : ses propriétés, sa fabrication, ses usages, les essais et normes spécifiques...Documentation d'entreprise (LHOIST, ENG, ALGRAN, ARCELOR-MITTAL...)
- Consultations en ligne : nombreux et variés sites Internet.

La plupart de ces références est signalée en bibliographie.

### 2.2. Activité de terrain

- Visites des sites avec pour chacun : observation, compréhension du terrain, ses formations, sa structure, les faciès en présence...
- Etat actuel des lieux : l'exploitation, sa progression, les contraintes rencontrées, les projections envisagées...
- Prélèvement d'échantillons

L'opération-type a été réalisée selon un ou plusieurs profils, traversant autant que possible perpendiculairement, la stratification et les fronts de taille tout en allant dans le sens de progression de la carrière. Le prélèvement, assez sommairement cartographié, comporte un nombre d'échantillons variable selon les possibilités de chaque site. Dans le cas de conditions d'affleurement favorables, comme celles rencontrées à l'Oum Settas, une cartographie plus précise a permis d'effectuer un prélèvement d'une séquence en banc par banc.

En tout, près de 200 échantillons ont été prélevés.

Nota: les échantillons sont des composites, ils représentent la variabilité des faciès rapidement reconnus, pris sur un rayon de 2 à 3 m autour d'un point central. Les fragments (3 à 5 par sachet numéroté), sont de taille décimétrique. Ils sont frais, sans fractures et débarrassés d'encroûtements et de parties altérées...Ces échantillons ont été divisés en deux parts. Une part a subi diverses préparations en vue d'analyses, d'essais et tests divers. L'autre part est conservée comme témoin.

### 2.3. Préparation et traitement des échantillons

- Préparations de sucres et de lames minces (nombre selon site), pour observations à la loupe binoculaire et au microscope.
- Le concassage ainsi que le broyage sont réalisés en partie à la faculté des Sciences de la terre, université Mentouri- Constantine. Le concassage est opéré au moyen du concasseur à mâchoires et le broyage dans le broyeur excentrique à anneaux et cylindres dont est équipé l'atelier du département Sciences de la Terre. Un nettoyage systématique des appareils, opéré avec soin, est effectué à la fin de chacune de ces opérations afin de minimiser la contamination des échantillons. Ces opérations répondent à diverses granularités adaptées aux besoins des essais et analyses.
- D'autres préparations de conditionnement, des mises en solution d'échantillons sont effectuées par le laboratoire central de l'entreprise LHOIST en Belgique, à partir de fragments concassés ou broyés.
  - Pour essais granulométriques.
  - Broyage fin pour analyses chimiques : spectrométrie d'absorption atomique (AAS), spectrométrie de fluorescence X (XRF) ou par quantométrie à plasma. Cette opération a concerné la totalité des échantillons.
  - Broyage grossier et fin pour quelques échantillons destinés à des essais de cuisson et des analyses Thermiques.

### 2.4. Essais et analyses réalisés par le laboratoire de l'entreprise LHOIST (Belgique)

❖ Quelques essais physiques et physico-mécaniques sont réalisés sur des échantillons choisis pour leur représentativité relative et provenant des différents sites étudiés. De tels essais permettent de caractériser quelques uns des paramètres les plus en vue pour diverses applications. Egalement des tests de cuisson sont faits pour apprécier le comportement thermique de calcaire et de dolomie durant la montée en température et les transformations subies.

NOTE : L'obtention d'une variété donnée de chaux ne saurait être ciblée ici. Seuls des essais semi-industriels voire industriels permettront-sur de grosses quantités de matériaux-d'atteindre un tel objectif.

❖ Des analyses Thermiques ont été effectuées sur des échantillons de dolomie provenant de la carrière de Téioualt.

❖ Des analyses chimiques par spectrométrie d'absorption atomique (AAS) couplées à des analyses par spectrométrie de fluorescence des rayons X (XRF) et quelques fois par quantométrie à plasma ont été réalisées pour la totalité des échantillons prélevés.

❖ Des analyses par diffraction des rayons X (XRD) ont été effectuées sur poudres désorientées provenant des massifs du Safia, de l'Oum Settas et de Téioualt. Pour ces derniers sites, des minéraux friables, contenus parfois dans des poches karstiques rencontrées dans ces carrières, ont pu être identifiés.

A l'exception de ces analyses, réalisées au laboratoire de physique des matériaux, université de Constantine, tous les autres essais et analyses l'ont été dans les laboratoires du centre de recherche du groupe LHOIST basé à Nivelles en Belgique, selon les modes opératoires utilisés dans ces structures et répondant aux normes qui y sont en vigueur.

## **2.5. Visites d'usines**

Les passages dans diverses unités ont permis de suivre les processus de transformation depuis le poste de prélèvement de la matière première venant de la carrière jusqu'à l'atelier de conditionnement des produits finis ou destinés aux opérations ultérieures. Ainsi des visites guidées ont eu lieu à :

- l'unité de chaux intégrée au complexe sidérurgique d'El Hadjar où des explications ont été données à propos du processus de transformation du calcaire (et de la dolomie) en chaux.
- à des carrières relevant de l'entreprise Lhoist, situées en Belgique : Bois-Des-Gattes (calcaire), Marche-Les-dames (dolomie), Jemelle (calcaire) et usines correspondantes de transformation des matières premières en chaux. Outre les explications, de la documentation y a été fournie.

## **2.6. Visites de laboratoires**

### **2.6.1. Laboratoire central de l'entreprise Lhoist (Belgique).**

Rappelons que LHOIST, est une entreprise spécialisée dans la préparation des calcaires et dolomies crus ainsi que leurs transformations en chaux. Elle en est l'un des leaders mondiaux si ce n'est le leader dans ce secteur d'activité. La visite au centre de recherche basé à Nivelles (Belgique) a permis de passer dans différents ateliers bien équipés en matériels et appareillages pour des préparations, des analyses d'échantillons, des essais et tests routiniers ou de performances, d'améliorations et d'élaboration de nouveaux produits provenant des unités de l'entreprise réparties à travers le monde et destinés à une clientèle de plus en plus variée et exigeante...

### **2.6.2. Laboratoire national de l'ENG (Oum Settas, El Khroub).**

Ce laboratoire d'envergure nationale, implanté à El Khroub, effectue différents tests qualitatifs, essentiellement physiques et physico-mécaniques dans le but de caractériser et de contrôler les matériaux (granulats calcaires et carbonates de calcium en poudre) selon les normes en vigueur. Matériaux provenant des différentes unités relevant de l'ENG. Parmi les opérations réalisées, citons les analyses granulométriques, les essais d'usure (micro-Deval, Los Angelès...) et de résistances mécaniques, les déterminations de divers paramètres :

porosité, masses volumiques, tests de coloration, de blancheur ainsi que des analyses chimiques élémentaires...

### **2.7. Traitement des données**

Des approches statistiques sur les données chimiques ont été menées pour les sites offrant des conditions d'applications favorables avec notamment un nombre suffisant d'observations (échantillons). Elles s'appuient sur le logiciel en ligne EXCELL et sur le logiciel « STATISTICA » version 2006.

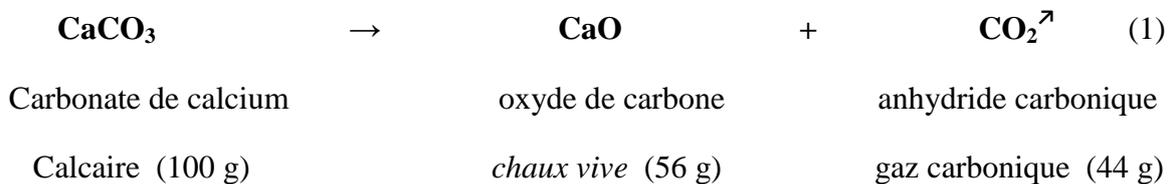
## Chapitre 3 : LA CHAUX, DEFINITIONS, PROPRIETES

### 3.1. Définitions, nomenclature

La chaux est un matériau courant. Il fait partie de notre quotidien, car utilisé en de nombreuses occasions vu l'étendue de ses rôles et de ses capacités. Nous croyons bien le connaître car à priori simple mais sa richesse nous échappe. Il n'en n'est pas moins un matériau complexe, à la fabrication de plus en plus fine et « scientifique », constituant indispensable de bien des domaines industriels. C'est la chaux, sous des formes à chaque fois adaptées, que l'on retrouve comme « fondant » en sidérurgie, comme réactif dans la fabrication de l'aluminium, pour améliorer les qualités routières des sols ou encore pour traiter les eaux usées et les fumées... (Claude, 1994)

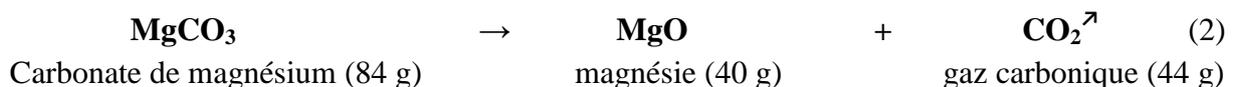
C'est que la chaux, connue et utilisée depuis plusieurs millénaires souffre d'un problème de terminologie car il y en a plusieurs variétés et il apparaît indispensable de préciser les définitions et les acceptions traditionnellement utilisés dans la profession. Les principales distinctions reposent sur des *critères de constitution chimique*.

La chaux est, d'une façon générale, obtenue par calcination d'un calcaire à une température supérieure à 900°C. Le carbonate de calcium, constituant essentiel du calcaire, se dissocie à cette température pour donner de l'oxyde de calcium (**chaux vive**) et du gaz carbonique :



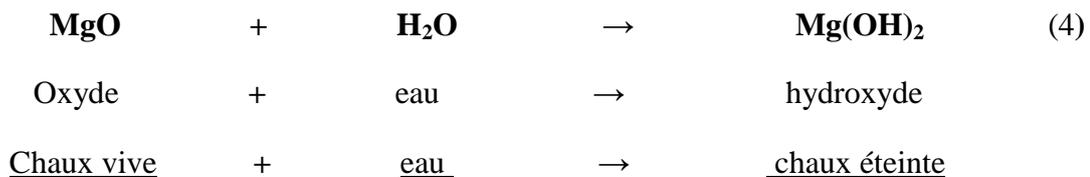
Les *chaux grasses* obtenues à partir d'un *calcaire très pur* doivent leur nom à l'onctuosité qu'elles donnent aux mortiers, lorsqu'elles sont utilisées en construction. Autrefois avec des calcaires un peu moins purs on fabriquait aussi des *chaux maigres*. Lorsqu'elles sont utilisées en construction les chaux grasses et les chaux maigres font prise en se *recarbonatant* en contact du gaz carbonique de l'air. Elles sont donc appelées **chaux aériennes**. Elles peuvent être **vives** ou, comme nous le verrons plus loin, ou **éteintes**.

Dans certains calcaires et dans les *dolomies*, le carbonate de magnésium est associé au carbonate de calcium. Il se dissocie de la même manière mais à une température inférieure, pour donner de l'oxyde de magnésium (magnésie) et du gaz carbonique :



La calcination des calcaires magnésiens et des dolomies donne ainsi des *chaux magnésiennes* contenant à la fois chaux et magnésie. Mais on utilise aussi le terme de *chaux dolomitique* pour désigner les chaux issues de dolomies.

Les oxydes de calcium et de magnésium réagissent avec l'eau pour donner des hydroxydes de calcium et de magnésium. Cette réaction est appelée *extinction* ou *hydratation*.



Oxydes et hydroxydes de calcium et de magnésium sont des *produits basiques*.

On fabrique aussi des chaux à partir des calcaires qui contiennent de 15 à 20 % d'argile. Dans ce cas il se forme au cours de la calcination des silicates et des aluminates de calcium en quantités suffisantes pour donner à ces chaux la propriété de faire *prise sous l'eau*. On a alors affaire à des *chaux hydrauliques* et plus précisément à des chaux hydrauliques *naturelles*. Il existe en effet des « chaux hydrauliques *artificielles* » qui ne sont pas à proprement parler des chaux et qui résultent du broyage simultané de *clinker de ciment* et de matériaux inertes (pouzzolanes, scories de hauts fourneaux...). Ce sont les ciments Portland artificiels ou CPA.

Nous nous attachons à décrire les propriétés et les utilisations des *chaux aériennes*, dont l'usage est le plus répandu et le plus général.

Produit multifonctionnel à usages multiples, la chaux doit satisfaire un grand nombre d'exigences exprimées dans diverses normes : normes de produits comme normes d'applications contenant les spécifications détaillées en rapport avec l'usage considéré. Dans la première catégorie et pour les usages les plus importants, citons deux normes franco-européennes:

- la norme NF EN 459 chaux de construction (chaux calcique et chaux dolomitique) qui se subdivise en trois parties : NF EN 459 1, NF EN 459 2, et NF EN 459 3.

- La norme NF EN 12518 produits chimiques (incluant la chaux) utilisés pour le traitement de l'eau destinée à la consommation humaine.

Dans la seconde catégorie, nous citerons par la suite d'autres normes et leur équivalent, qui sont, en fait, des adaptations au contexte national.

### 3.2. Propriétés physico-chimiques des chaux aériennes

Ces propriétés découlent directement de la constitution du calcaire de départ et de la température à laquelle il a été calciné. Nous rappellerons succinctement les principales d'entre elles.

#### 3.2.1. Réactivité à l'eau et extinction de la chaux vive :

L'oxyde de calcium donne à la chaux vive un caractère *hydrophile* important. En présence d'eau, la chaux vive (en roche ou sous forme de poudre) devient instable et se transforme aisément en hydroxyde de calcium  $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$  ou chaux éteinte [voir réaction (4)] qui, en conditions et quantités d'eau contrôlées, s'obtient sous forme solide. De plus, cette réaction d'hydratation est fortement exothermique (1155 kJ/kg de CaO). Le suivi de la *production de chaleur au cours du temps* est, par ailleurs, mis à profit pour tester **la réactivité** d'une chaux vive (Fig.3.1) ou rapidité d'action lors de son emploi. Ce paramètre permet à l'utilisateur de prévoir et de maîtriser la durée des réactions et, si celles-ci sont exothermiques, l'élévation de température produite.

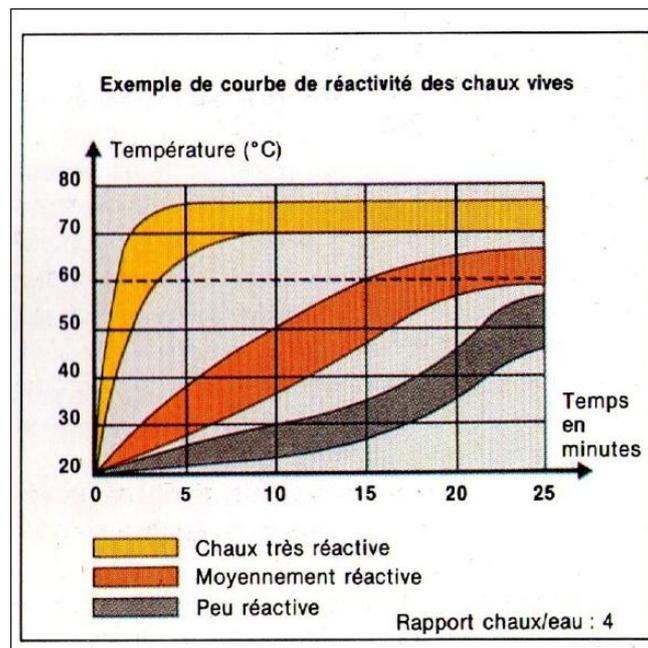


Fig. 3. 1-Réactivité ou temps mis par la chaux (calcitique) pour atteindre 60°C (Claude, 1994).

En outre, ce dégagement de chaleur s'accompagne d'un *accroissement de volume* (facteur d'expansion :  $\times 2.5$ , dû à la fracturation lors de la cuisson) et d'une *augmentation de la finesse des grains* (réduction de la taille des cristaux de départ). Chaque type de chaux possède sa réactivité propre qui dépend à son tour des spécifications d'application et du procédé de fabrication.

La réactivité de la chaux vive est une mesure de la vitesse à laquelle la chaux vive réagit en présence d'eau. La norme européenne EN 45 9-2 décrit la méthode de test utilisée pour

mesurer la réactivité de la chaux broyée par extinction avec de l'eau. Pour mesurer la réactivité de la chaux en morceaux. La réactivité de la chaux dépend de différents paramètres liés aux matières premières et au procédé employés. Ces paramètres sont :

- la température et la durée de cuisson,
- la structure cristalline du calcaire,
- les impuretés présentes dans le calcaire,
- le type de four et de combustible.

La classification de la chaux s'effectue souvent en fonction de sa réactivité, et notamment avec les termes suivants :

- surcuite,
- dure,
- moyenne,
- douce.

La figure 3. 2- montre différentes morphologies (forme des particules) et de surfaces de la chaux douce et de la chaux dure vues au microscope électronique à balayage (MEB) -

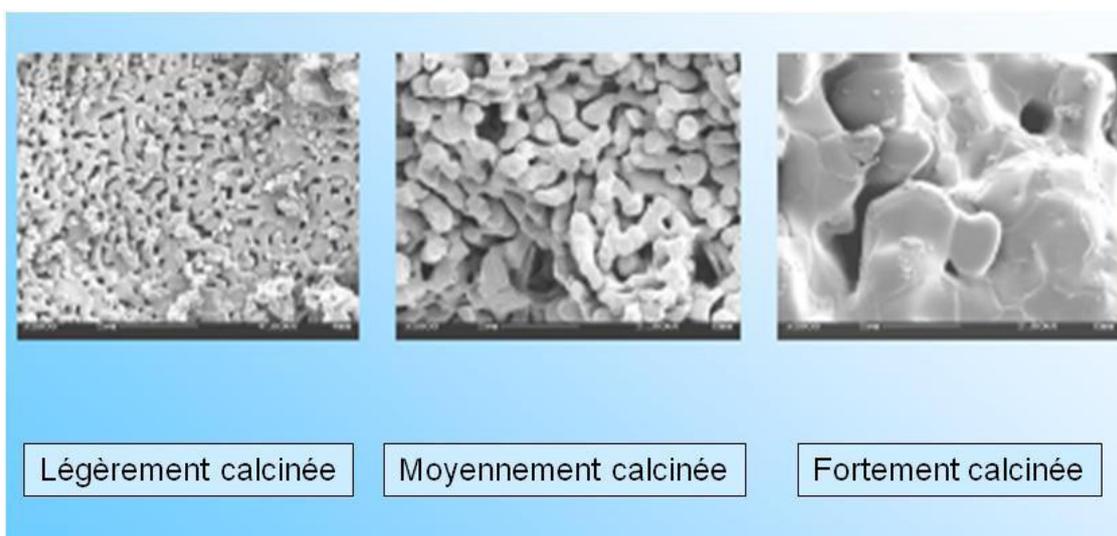
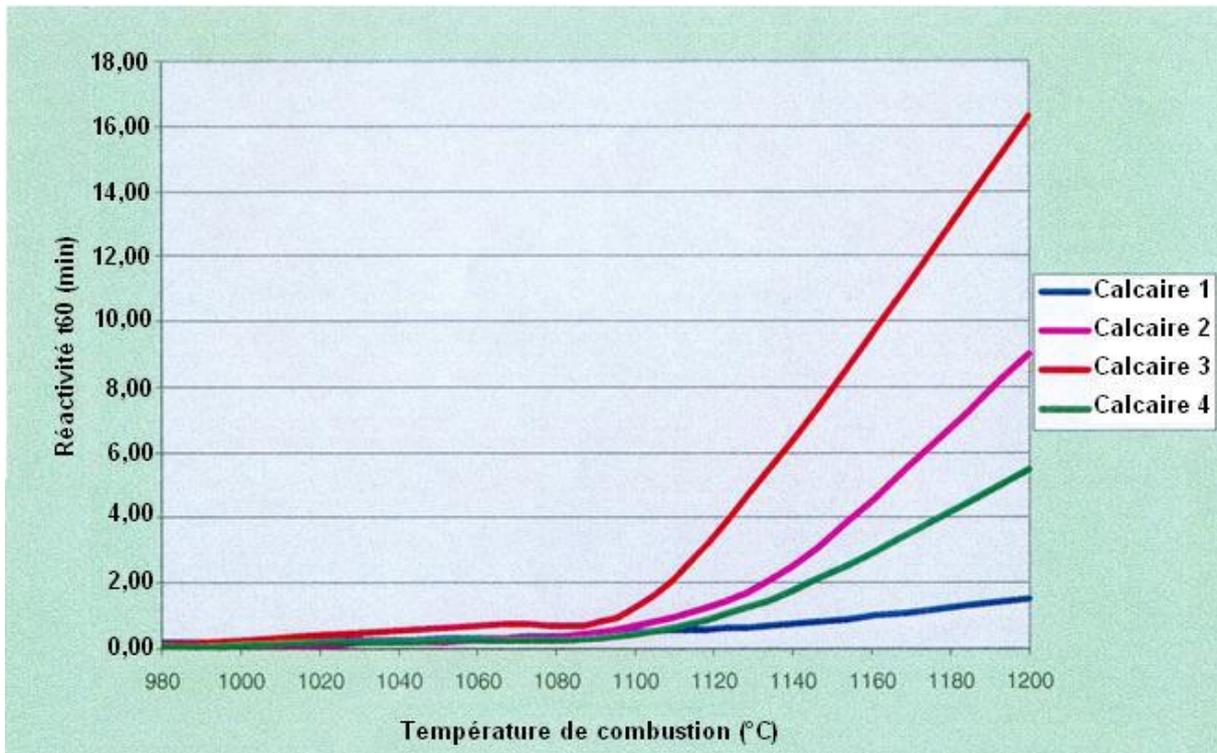


Fig. 3.2- Morphologie de la chaux *douce*, *moyenne* et *dure*. Image MEB (x 5000), [in BREF, 2010].

La méthode standard européenne pour évaluer la réactivité de la chaux consiste à mesurer une durée appelée « t60 » c'est-à-dire *le temps* qu'il faut à un mélange de chaux et d'eau pour passer de 20 à 60 °C dans des conditions normalisées. En pratique, plus ce « **t-60** » est élevé, plus la réactivité de la chaux produite est faible. Il n'existe toutefois aucune norme pour définir la qualité du produit (douce, moyenne ou dure) car les seuils ne sont pas clairement déterminés. La Figure (3.3) montre l'évolution de la réactivité (**t-60**) en fonction de la température de cuisson ainsi que de la nature du calcaire.



**Fig. 3.3:** Evolution de la réactivité en fonction de la température de cuisson et du type de calcaire [In BREF-2010]

Lorsque sa réactivité est faible, la chaux est souvent qualifiée de moyenne, dure et surcuite. La baisse de réactivité s'accompagne d'une réduction de la surface et de la porosité de la chaux, un phénomène appelé frittage.

La *chimie* et la *réactivité* de la chaux sont les principaux paramètres qui gouvernent le marché d'un tel produit (BREF, 2010).

Des données concrètes sur cet important caractère seront présentées dans la partie « applications » (Chapitre 10).

Cette propriété est utilisée pour des assèchements de toute nature (agriculture, constructions routières...).

Par ailleurs, contrairement à la chaux vive, la chaux hydratée est capable de fixer le gaz carbonique de l'air, en atmosphère humide, pour donner du carbonate de calcium selon la réaction :

$$\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}, \quad (5),$$

C'est la *recarbonatation* (la chaux « revient » en quelque sorte à son état calcaire d'origine). Cette propriété induit l'usage de la chaux comme mortier dans le bâtiment, mais aussi comme « absorbeur » de gaz carbonique propice à la fabrication de sucre et à l'adoucissement des eaux calcaires.

### 3.2.2. Structures cristallines :

L'oxyde de calcium, pur, cristallise dans le système cubique (maille élémentaire:  $a = 4.8 \text{ \AA}$ ). Les particules de chaux éteinte sont microcristallines ou de taille colloïdale, et peuvent cristalliser dans le système hexagonal ( $a = 3.58 \text{ \AA}$ ,  $c = 4.9 \text{ \AA}$ ). (Fig.3.4)

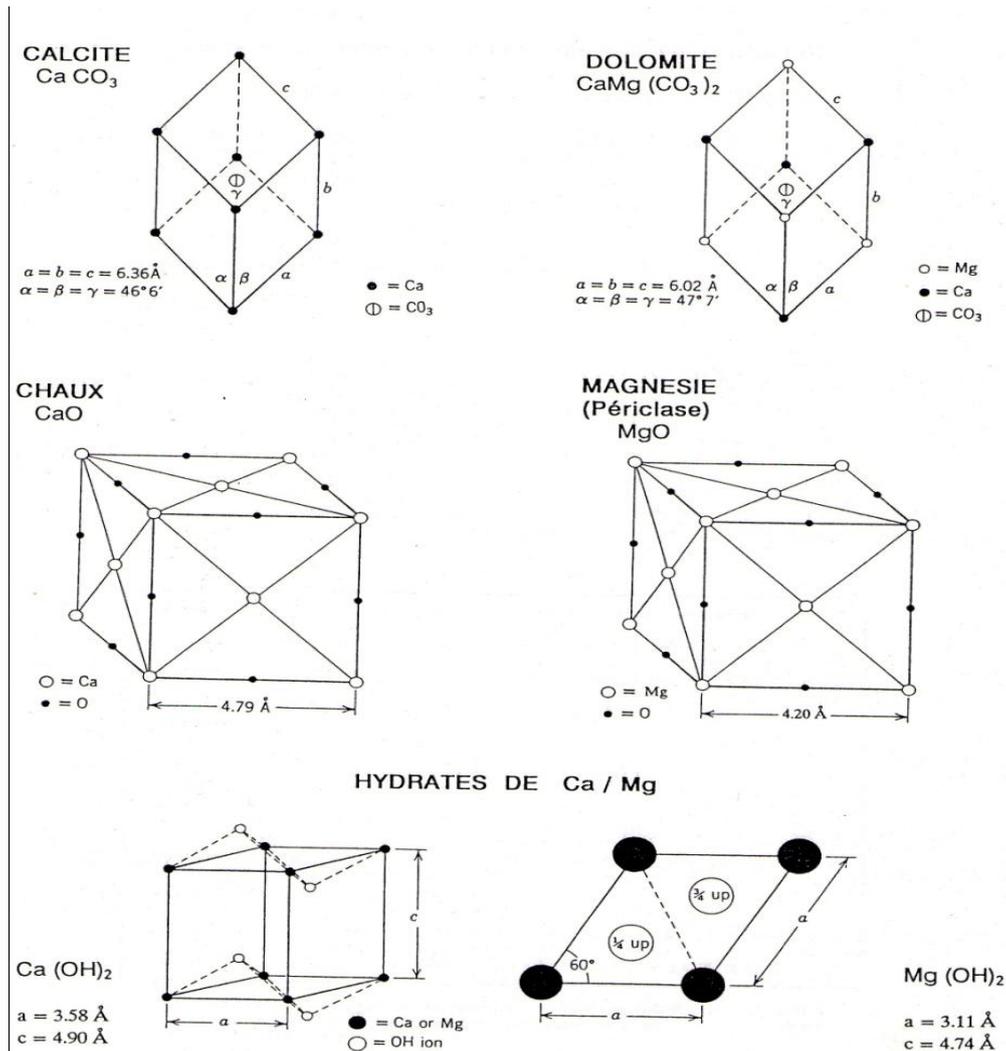


Fig. 3.4-Maillles élémentaires des principaux carbonates, oxydes et hydroxydes de Ca et de Mg (Lauwers-Lhoist, 1992))

### 3.2.3. Poids spécifique et densités :

Le *poids spécifique* de la chaux vive (à porosité nulle) varie de **3,25 à 3,38** ; celui de la chaux hydratée est moindre, sa valeur calculée étant de **2,24**. (Herrier G. et Al, 2010).

La *densité apparente* des particules de chaux vive est comprise entre 1,6 et 2,8 selon le degré de porosité ou, à l'inverse, de *frittage\** des particules (\* traitement thermique). La réaction d'hydratation entraîne une diminution de la densité apparente. Les chauffourniers définissent une autre densité : *La densité apparente en vrac*... (Herrier G. et Al, 2010).

La *porosité des grains* est dépendante à la fois, de celle du calcaire de départ et des conditions de sa calcination. Elle peut varier en pourcentages dans une gamme de 25 à 55 %.

### 3.2.4. Solubilité et pH :

Comme la plupart des sels de calcium, la chaux est *peu soluble* dans l'eau (un peu plus de *1g/litre*) et sa solubilité décroît avec la température. Si l'on mélange chaux et eau de façon à dépasser le seuil de solubilité, la chaux en excès passe en suspension pour devenir de l'eau de chaux puis « *lait de chaux* » pour des concentrations plus élevées (30 à 150 g/l de chaux éteinte). Lorsque cette teneur est augmentée de 40 à 60 %, on obtient une pâte malléable constituant un excellent mortier pour l'industrie du bâtiment et pour les façonnages en sculpture.

D'autre part, lorsqu'on met de la chaux dans une solution apte à la formation de sels de calcium, leur très faible solubilité dans l'eau les fait précipiter : leur élimination devient ainsi très aisée. Ce phénomène se produit ainsi en présence des phosphates et des métaux lourds contenus dans les eaux usées, ce qui favorise leur séparation. Le diagramme de la figure 3.5 montre les domaines de précipitation de certains métaux en fonction du pH. (Claude, 1994).

Métal \ pH	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Aluminium			■	■	■	■	■		
Cadmium								■	■
Chrome				■	■	■	■	■	■
Cobalt								■	■
Cuivre				■	■	■	■	■	■
Fer		■	■	■	■	■	■	■	■
Plomb						■	■	■	■
Manganèse								■	■
Mercure			■	■	■	■	■	■	■
Nickel								■	■
Argent				■	■	■	■	■	■
Zinc							■	■	■

Fig.3.5- pH et précipitation de sels de quelques métaux par la chaux.

Comme pour le calcaire, la présence de calcium fait de la chaux une *base forte* (sa dissolution dans l'eau provoque une augmentation de pH jusqu'à 12.4 (dans les conditions normales à 25° C). Cette propriété la rend apte à neutraliser des acides ou à jouer le rôle de réactif chimique dans diverses opérations (traitement des eaux, des sols, industries chimiques et papetières, valorisation des minerais...). Elle induit aussi un caractère *caustique* important, d'où de nombreuses applications de *désinfection* connues depuis longtemps.

### 3.2.5. Flocculation, réactions pouzzolaniques :

La chaux permet la coagulation et la précipitation de nombreuses matières organiques en suspension dans un liquide, dans une réaction de *floculation*. Ce caractère intervient pour concentrer des boues usées, traiter des sols argileux en industrie routière ou des résidus pétroliers comme les « marées noires » ou encore, lorsqu'il s'agit de donner une structure grumeleuse à des produits organiques, pour mieux les séparer ou les manipuler ;

Elle effectue des *réactions pouzzolaniques* avec plusieurs matériaux comme les basaltes, l'argile ou les cendres, en formant avec eux les silicates ou aluminates de calcium qui durcissent comme un ciment (assises de chaussées, traitement de sols, réactions avec le laitier des hauts fourneaux...) (Claude J., 1994 ; Herrier G. et Al, 2010).

### 3.3. Autres propriétés :

- Les chaux se reconnaissent par leur teinte, généralement blanche. Elles peuvent être légèrement teintées en présence d'impuretés. La *blancheur* est déterminante pour certaines applications (papeterie, industrie pharmaceutique).
- Leur odeur est à peine terreuse et non agressive.

Ce sont des produits stables, nécessitant néanmoins des précautions de stockage et de conservation, surtout pour la chaux vive qui craint fortement l'humidité et doit de plus, être manipulée avec beaucoup de soin, évitant le contact direct avec la peau.

La chaux vive peut avoir des réactions chimiques avec divers composés :

- des réactions avec les gaz acides (acide chlorhydrique, composés sulfurés...) à températures élevées, avec les métaux, avec le carbone... (Herrier G. et Al, 2010).
- la chaux hydratée provoque, de son côté, la neutralisation d'acides en solution aqueuse, la neutralisation de gaz acides, des réactions avec les carbonates alcalins, avec la silice et l'alumine, des réactions avec divers métaux et avec le chlore...,
- la chaux possède ainsi diverses propriétés, aux multiples facettes et dont les utilisations dans de nombreux domaines ne sont pas encore épuisées.

### 3.4. Caractérisations des chaux aériennes

Les différentes catégories de chaux commerciales sont définies par certains paramètres physico-chimiques dont les plus importants sont la réactivité, la teneur en oxydes disponibles, la densité apparente, la solubilité, la basicité, les teneurs en composants associés. S'ajoutent également l'appréciation de caractères tels que la perte au feu, la finesse de la chaux hydratée ou encore l'essai de la teneur en chaux disponible et autres essais particuliers pour le domaine de la construction (Herrier G. et Al, 2010)...paramètres que nous considérerons ultérieurement dans le chapitre 10.

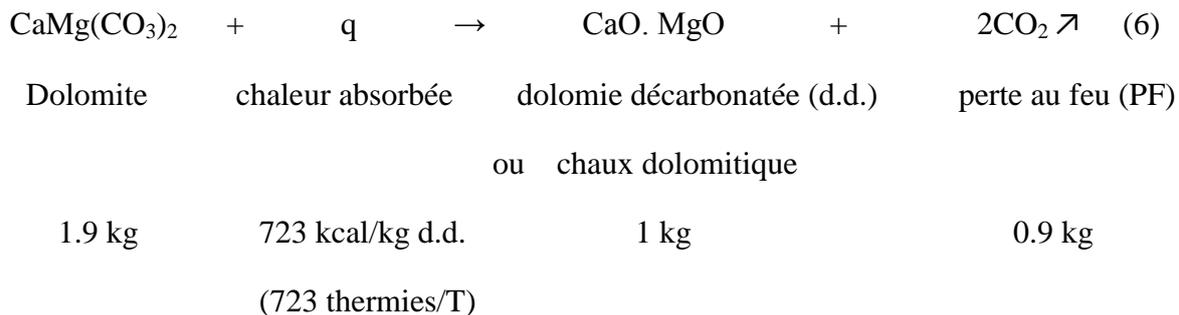
### 3.4.1. Spécificités des chaux dolomitiques - réactions fondamentales :

La chaux magnésienne présente des caractères proches de ceux des chaux calciques, caractères prolongeant eux-mêmes - ceux de leurs roches mères respectives : la dolomie et le calcaire. Evoquons quelques réactions fondamentales (*Lauwers, 1992*).

a)-Décarbonatation: elle se produit de deux manières, comme indiqué ci-après :

\_ Si  $pCO_2 < 100 \text{ mm Hg}$  sous vide partiel ou total ; ( $p$  : pour pression partielle),

→ décomposition en une étape vers **700 – 800°C** :

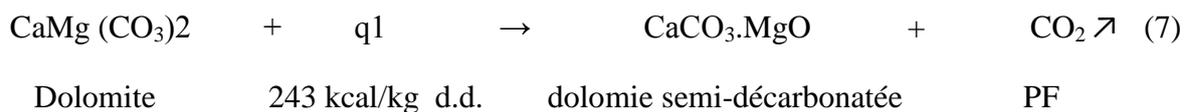


Remarque : en comparaison, la production d'1 T de chaux CaO requiert environ 770 thermies.

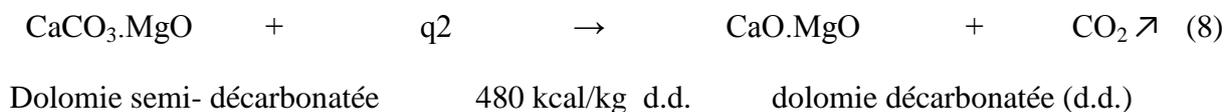
\_ Si  $pCO_2 > 100 \text{ mm Hg}$  (« atmosph. de  $\text{CO}_2$  = cas d'un four à chaux) ;

→ décomposition en deux étapes successives :

• à T1  $\approx$  550 – 765°C :

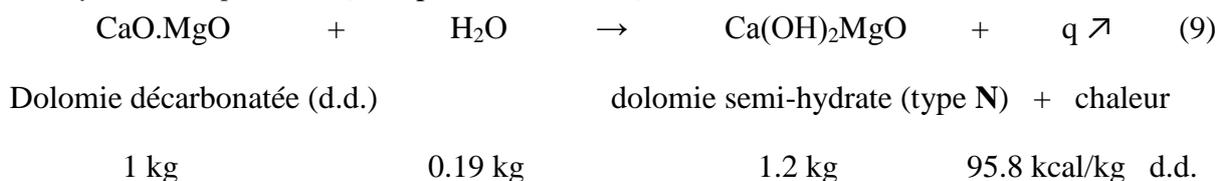


• à T2  $\approx$  900 – 960°C :



#### b)-Hydratation

- Hydratation partielle (sous pression normale):



- Hydratation totale (sous haute pression : P) :



Dolomie décarbonatée chaux dolomitique fortement hydratée (type S)

1 kg

0.37 kg

1.34 kg

c)-Frittage

Le frittage est une phase de traitement thermique dans laquelle le CO<sub>2</sub> émis pendant la décarbonatation diffuse au travers de la couche de CaO formée, entraînant la modification de la porosité, la croissance de grains de chaux... (Fig. 3.6)

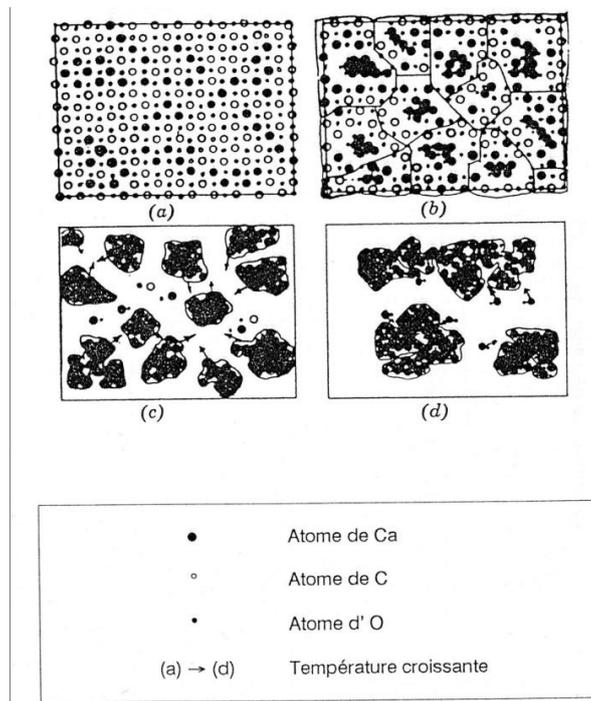


Fig. 3.6- Représentation schématique du processus de frittage dans une chaux CaO -

« Le frittage est, en fait un processus de transport de matière des parties riches vers des parties déficientes (telles que des joints de grains et via, par exemple, les lacunes dans le réseau cristallin de l'oxyde de calcium) par un processus de minimisation de l'énergie de surface du grain de chaux » ... (Lauwers A., 1992 ; Herrier G. et Al., 2010). Il se déroule comme suit :

$$T = 1800 - 2000^\circ\text{C} (*) + \text{temps}$$



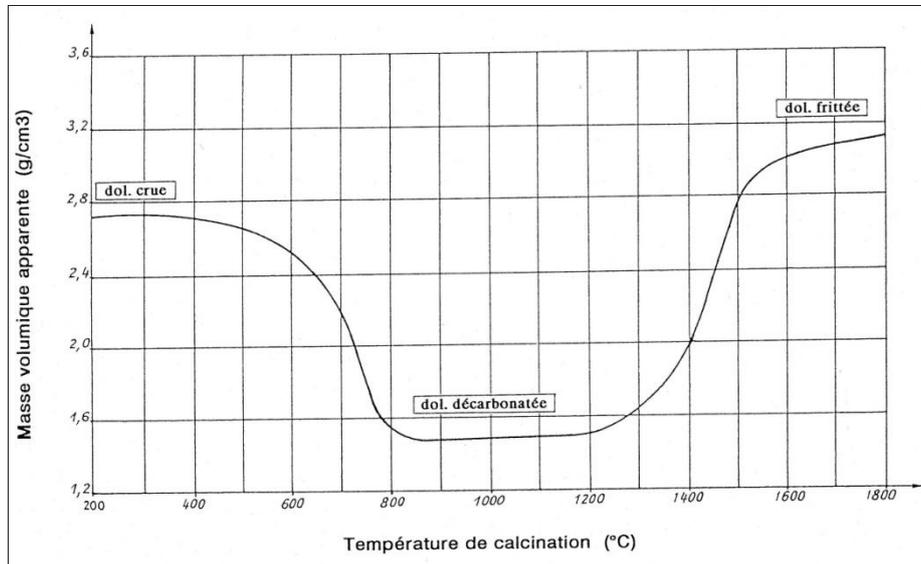
Chaux dolomitique (ou d.d.)

Dolomie frittée (ou dolomie cuite à mort),

En conséquence, on constate :

- une forte réduction de la surface spécifique,
- une contraction de volume d'environ 55%,

• une *densification accrue* : La masse volumique apparente (MVA) passe de  $1.48 \text{ g/cm}^3$  à  $3.20 - 3.30 \text{ g/cm}^3$  alors que la MVA de la dolomie crue varie entre  $2.75$  et  $2.90 \text{ g/cm}^3$ , (Fig.3.7).



**Fig. 3.7-** Courbe d'évolution de la MVA d'une dolomie cuite pendant 2 heures (Lauwers).

- une réduction de la *porosité* : d'environ 50%,
- une réduction importante de la *réactivité chimique* (hydratation, recarbonatation... lentes, ce qui rend le produit presque complètement inerte).

(\*) Mais, souvent de fait, la température de frittage est abaissée à  $1400 - 1600^\circ\text{C}$  en présence d'impuretés chimiques (pierres, cendres du combustible, ou ajout volontaire).

Remarque : Le frittage est souvent réalisé aussi sur certains calcaires et dolomies lors des processus de fabrication de leurs produits réfractaires (briques réfractaires et liants appropriés).

#### d)-Recarbonatation

Les réactions de recarbonatation nécessitent des conditions préalables de pression, température, atmosphère plus ou moins humide. La recarbonatation des oxydes et hydrates dolomitiques affecte quasi exclusivement leur *fraction calcique*. Elle permet d'obtenir :

1 : *dolomie décarbonatée* :



2 : *dolomie semi-hydrate* (type N)

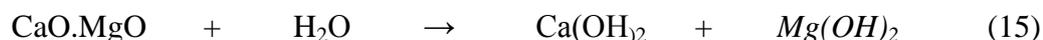


3 : *dolomie totalement hydratée* (type S)



### 3.4.2. Autres réactions des chaux dolomitiques

L'industrie de la chaux a développé diverses applications spéciales, certaines relevant de la chimie fine. On compte parmi elles, la fabrication de *carbonate de chaux précipité (PCC)*, d'oxyde de magnésie (périclase), d'oxydes de Mg, de carbonates de Mg, du Mg métal... Divers procédés et brevets y ont été mis en jeu. Examinons *le cas du PCC* (Lauwers - 1992):



*Lait de chaux magnésienne*



PCC (\*\*)

(\*\*) La plus grande partie du PCC est fabriquée à partir de *lait de chaux*  $\text{Ca(OH)}_2$  recarbonaté.

Ainsi, à chaque type de chaux apparu dans le commerce est associée la gamme de ces paramètres, qui en détermine précisément cadre et modalités d'utilisation. Le PCC est essentiellement utilisé dans l'industrie papetière.

## 3.5. Fabrication industrielle de la chaux

### 3.5.1. Généralités

Parmi les paramètres influençant la calcination, citons : la nature de la roche, sa composition et les impuretés présentes, sa texture, sa cohésion... qui sont des éléments déterminants sur la cinétique de décarbonatation. De même, interviennent avec le type de combustible, la température maximale atteinte ainsi que la durée de cuisson, lesquelles agissent considérablement sur les phénomènes de recuit ou de frittage de la chaux. Notons aussi que la pression ambiante durant la cuisson, la présence de  $\text{CO}_2$  et de vapeur d'eau – en proportions respectives adéquates – jouent un rôle important lors des phénomènes précédents.

### 3.5.2. Etapes de la fabrication

La fabrication industrielle de la chaux consiste à transformer un matériau naturel (calcaire ou dolomie) en un produit aux multiples usages, avec des spécifications techniques différentes

et adaptées à ces usages. Cette fabrication passe par de étapes. Une fois le site retenu, la première phase va de l'exploitation à la préparation de la roche à l'enfournement. La suivante concerne la calcination proprement dite de la pierre fragmentée dans des fours. La dernière permet l'élaboration et le conditionnement du produit final avant chargement pour expédition.

La roche qui répond aux critères de fabrication est extraite du sol puis acheminée vers la chaîne de traitement pour être réduite aux dimensions souhaitées par le chauffournier. Elle est généralement débarrassée des impuretés par criblage préalable (voie sèche) ou lavée si nécessaire et ne doit contenir qu'un minimum de particules fines. D'ailleurs, les particules de dimensions inférieures à 10 mm sont considérées comme « difficiles » à traiter en raison de problèmes qu'elles occasionnent dans les fours, dont le colmatage. Elles peuvent être utilisées pour d'autres usages (agriculture, routes...).

### 3.5.3. Les fours à chaux

Un four à chaux est un réacteur dans lequel des morceaux de calcaire (ou de dolomie) sont portés, pendant une durée déterminée à une température appropriée, dépassant les 800°C. Le processus de cuisson paraît simple mais il ne se déroule pas sans poser quelques problèmes car il faut traiter des tonnages importants et fabriquer un produit de très bonne qualité.

Selon la granulométrie de la pierre mais aussi selon les usages industriels, deux catégories de fours sont utilisés : les fours verticaux et les fours rotatifs. Sans aborder les détails des processus mis en jeu lors de la cuisson (thermodynamique, cinétique des réactions, transformations minéralogiques...), les fours, dans l'une ou l'autre de ces catégories, comportent en simplifiant une zone de préchauffage, une zone de calcination et une zone de refroidissement (*Claude-1994 ; Lhoist (1992,1996...)*). On retrouve une zonalité équivalente dans les fours rotatifs à ciments.

Dans les installations modernes, la cuisson se fait en flamme continu. Les parties exposées aux températures élevées sont généralement protégées par un garnissage de briques réfractaires dont la durée de vie est de 2 à 3 ans; leur rôle est de protéger la virole métallique externe et de limiter les pertes de chaleur par rayonnement des parois.

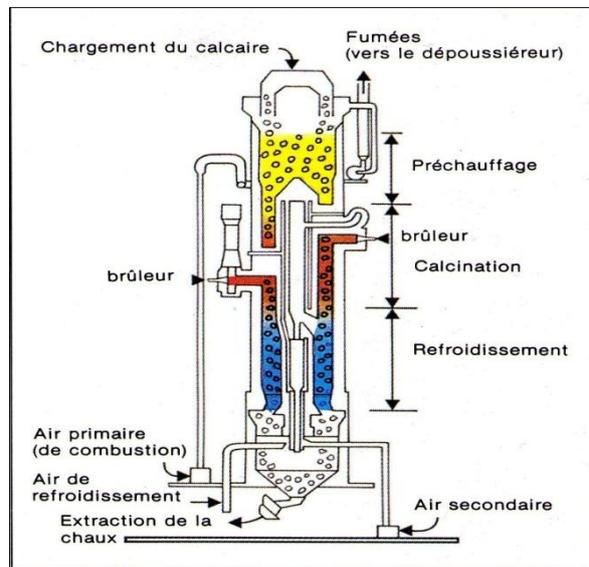
L'air réchauffé et les gaz de combustion circulent à contre courant dans l'enceinte du four et assurent la décarbonatation du minerai. Toutes les opérations sont de nos jours entièrement automatisées ; des instruments de mesure, de contrôle et de régulation permettent de suivre à distance le bon fonctionnement de l'ensemble.

#### - a) Les fours verticaux :

La fabrication industrielle de la chaux a débuté avec ce type de fours. Ils étaient surtout destinés à traiter de gros calibres, l'échange de la réaction matière-chaleur y est appréciable. Ils peuvent travailler avec de petits calibres, mais le rendement diminue. Le temps de séjour moyen de la matière est de l'ordre de 24 heures. Il existe plusieurs variantes dénommées :

fours à cuve (ou fours droits), fours annulaires (ou Warmestelle) et fours à flux parallèles. Les deux premiers peuvent être regroupés par batteries de quatre (Herrier G. et Al, 2010).

Dans ces fours, la cuisson du calcaire (ou de la dolomie) s'effectue progressivement en descendant verticalement dans une enceinte cylindrique en acier intérieurement garnie de briques réfractaires. Ce calcaire rencontre un courant de gaz chaud (air + combustible) ascendant avec lequel s'opèrent des échanges thermiques dans les trois zones évoquées plus haut : celle du préchauffage dans la partie supérieure, celle de la décarbonatation dans la partie centrale et celle du refroidissement dans la partie inférieure de l'enceinte. Le  $\text{CO}_2$  produit est évacué par l'air qui remonte vers la couche supérieure puis vers une cheminée de dépoussiérage. (Fig.3. 8)

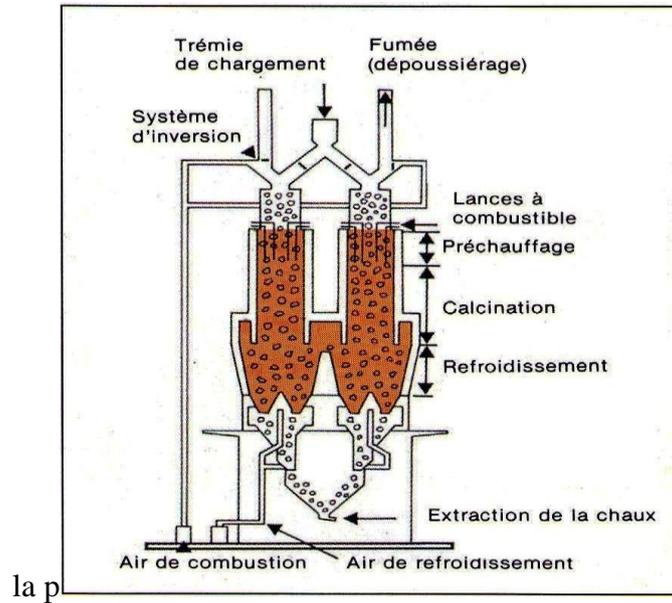


**Fig. 3.8-** Schéma simplifié d'un four vertical (Claude, 1994)

Enfin, lorsque le refroidissement est suffisant, la chaux est évacuée en partie basse. Cette extraction s'opère en simultané avec l'introduction d'une quantité équivalente de calcaire au sommet. Les fours modernes, qui permettent de grosses productions allant jusqu'à 600 t/jour et plus, utilisent le fuel ou le gaz naturel. Ces combustibles sont alors injectés par des lances aux deux tiers environ de la cuve ; ils s'enflamment et provoquent ainsi la combustion nécessaire dans la zone de chauffe de la cuve. Ce procédé, mis au point et constamment amélioré par la nature du combustible et son mode d'introduction, a l'avantage de répartir de façon homogène le combustible, et donc la chaleur dégagée par sa combustion, dans la masse de calcaire. Le bilan énergétique de l'opération s'en trouve nettement amélioré (moins de 1000 thermies par tonne produite), un minimum de calories étant ainsi perdu. La qualité de la chaux s'en trouve également améliorée du fait de la plus grande homogénéité de la cuisson. (Claude, 1994)

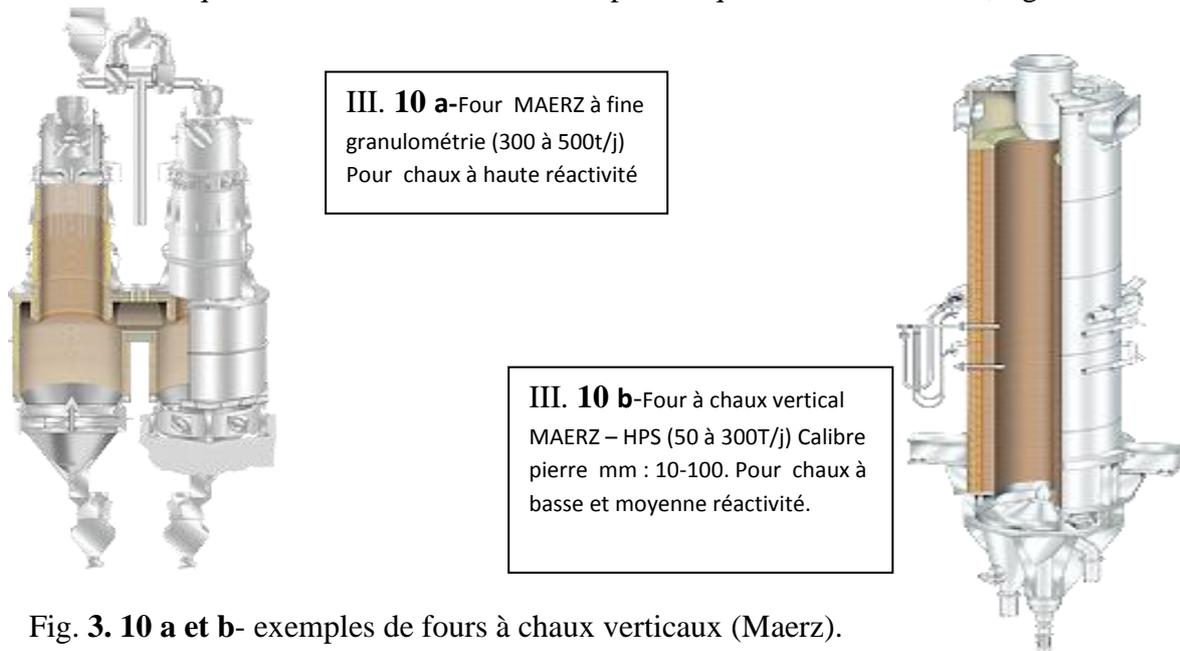
Il convient de signaler l'existence de variantes à ces fours verticaux parmi lesquelles *le four à cycles alternés* (fig.3.9) qui permet d'optimiser le rendement énergétique de la fabrication et

de produire de grandes quantités grâce à la combinaison de deux fours verticaux fonctionnant alternativement. Après enfournement sur une cuve, la combustion se fait sur l'autre permettant aux fumées de passer par le canal de liaison (ou « carneau ») et de préchauffer la pierre qui vient d'être enfournée.



**Fig.3.9-** Schéma simplifié d'un four à cycles alternés (Claude, 1994).

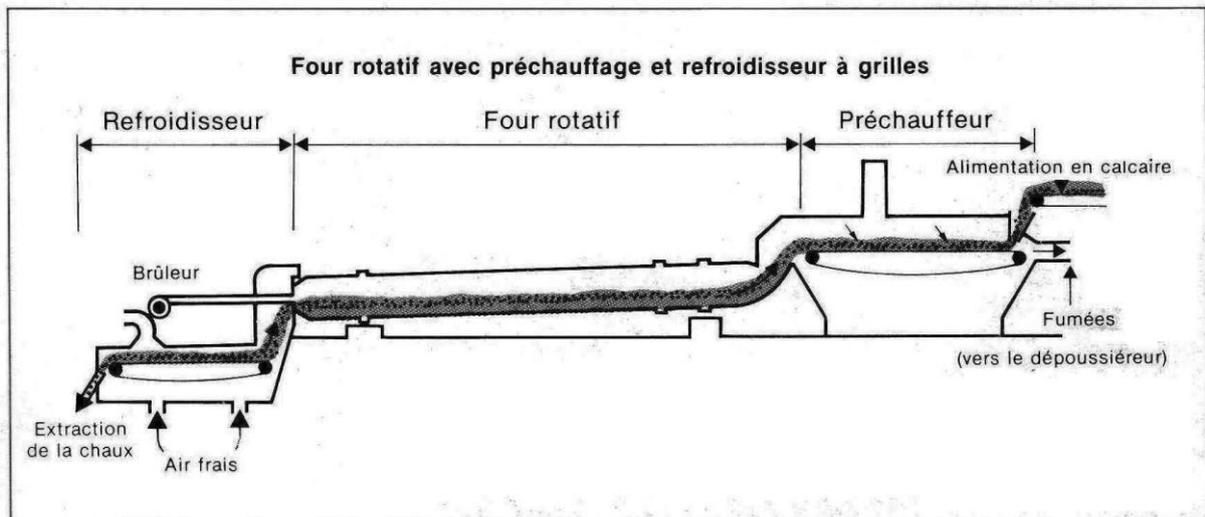
La charge est, avant tout, cuite suivant un flux parallèle et l'air de combustion est préchauffé par récupération. Un tel processus de cuisson est possible grâce au concours d'au moins deux cuves, dont le chauffage et le courant gazeux sont périodiquement inversés. Les fours du fabricant **Mears**, parmi les plus performants actuellement, sont de ce type. Ces modèles ainsi que les fours annulaires sont les plus fréquemment rencontrés, figure 3.10a et b.



**Fig. 3. 10 a et b-** exemples de fours à chaux verticaux (Maerz).

- b) Les fours rotatifs :

Ils sont inspirés des fours servant à fabriquer du ciment, mais fonctionnant à des températures de l'ordre de 1000 à 1300° C. Leur principe de fonctionnement est assez proche de celui des fours verticaux, en ceci que le calcaire effectue un chemin inverse de celui du mélange air/combustible dans le four et diffère en cela que l'opération s'effectue presque horizontalement. Au niveau du préchauffage et du refroidissement des grilles tournant en boucle assurent l'avancée du calcaire et de la chaux ; au niveau de la combustion, une légère pente associée à la rotation du four garantit l'écoulement naturel de la chaux. L'air frais est soufflé par le bas, via des grilles situées au niveau du refroidisseur (Fig. 3.11).



**Fig. 3.11-** Schéma simplifié d'un four à chaux rotatif (Claude, 1994)

Contrairement aux fours verticaux qui ont un enfournement et un défournement discontinus, le processus d'approvisionnement des fours rotatifs est entièrement continu. Le temps de séjour  $\tau$  est de l'ordre de 6 à 8 heures. (Herrier G. et Al, 2010)

Les fours rotatifs ont les avantages suivants :

- Des capacités de production élevées (plus de 1500t/jours),
- la possibilité d'utiliser de petits calibres de minerai moins gênants que dans les fours verticaux,
- une souplesse d'utilisation dans la capacité de production, et une meilleure adaptation à la production de qualités spéciales.

Par contre, leurs rendements calorifiques sont moins bons ( $\geq 1200$  thermies/tonne produite).

- c) Autres types de fours :

Nous citons pour mémoire l'existence d'autres types de fours, beaucoup moins répandus que les précédents, comme les fours type « Calcimatic » à soles tournantes ou les fours « cascades », allusion faite à la descente du minerai par paliers de cuisson...

D'une manière générale, de nos jours les fours à chaux font l'objet d'améliorations continues afin d'augmenter leurs performances et de les adapter à une production de plus en plus variée.

Pour résumer, le tableau ci-après (**Tableau. 312**) résume les principales caractéristiques des fours les plus répandus.

Types de fours	Nombre de fours*	Production (T/j)	Granularité. Alimentation (mm)
Four long rotatif ( <b>LRK</b> )	26	160 - 1500	2 - 60
Four rotatifs avec préchauffeur ( <b>PRK</b> )	20	150 - 1500	10 - 60
Fours verticaux à cycles alternés ( <b>PFRK</b> )**	158	100 - 600	10 - 200
Four annulaire ( <b>ASK</b> )	74	80 - 300	10 - 150
Four vertical à alimentation mixte ( <b>MFSK</b> )	116	60 - 200	20 - 200
Autres fours ( <b>OK</b> )	203	10 - 200	20 - 250
<b>Total</b>	<b>597</b>	-	-

Tab. **3-12-** Types et tailles de fours à chaux en service en U.E (BREF-2006) avec granularité des pierres à l'alimentation.

d)- Récapitulation sommaire

Rappelons aussi que la bonne conduite de la calcination des calcaires nécessite une connaissance aussi complète que possible :

- ÷ de la pierre,
- ÷ de l'outil de cuisson et de son combustible,
- ÷ du mécanisme de décarbonatation,
- ÷ des tests de caractérisation des produits...

### 3.5.4. Conditionnement de la chaux

A l'aval du four, diverses opérations sont menées :

- **Criblage**, permet de calibrer la chaux vive sortie four en différentes granulométries :
  - Fraction *roches* > 20 mm.

- Fraction  $5 \text{ mm} < \textit{grains} < 50 \text{ mm}$ .
- Fraction  $\textit{fines} < 5 \text{ mm}$ .

Ces chaux peuvent être commercialisées telles quelles, ou acheminées vers les ateliers de broyage ou d'hydratation.

- **Broyage**, certaines applications nécessitent des calibres plus fins. On parle de « chaux broyée » ( $< 2 \text{ mm}$ ), ou « pulvérisée » ( $< 200 \mu\text{m}$ ), ou « moulue » ( $< 90 \mu\text{m}$ ) selon la granulométrie finale.

Selon la dureté de la chaux et la finesse désirée, les broyeurs sont à marteaux, à meules ou éventuellement à boulets. Le tamisage du produit broyé se fait par des séparateurs dynamiques qui assurent une coupure granulométrique acceptable et évitent la présence de particules grossières qui pourraient être préjudiciables pour les utilisateurs.

- **Hydratation**, elle s'opère selon la réaction (3) ou la réaction (4) précédemment évoquées. Industriellement, cette réaction est mise en œuvre dans un réacteur appelé « hydrateur » où chaux et eau sont mises en contact (Fig. 3.13). L'hydratation est dite par *voie sèche* ou par *voie humide*.

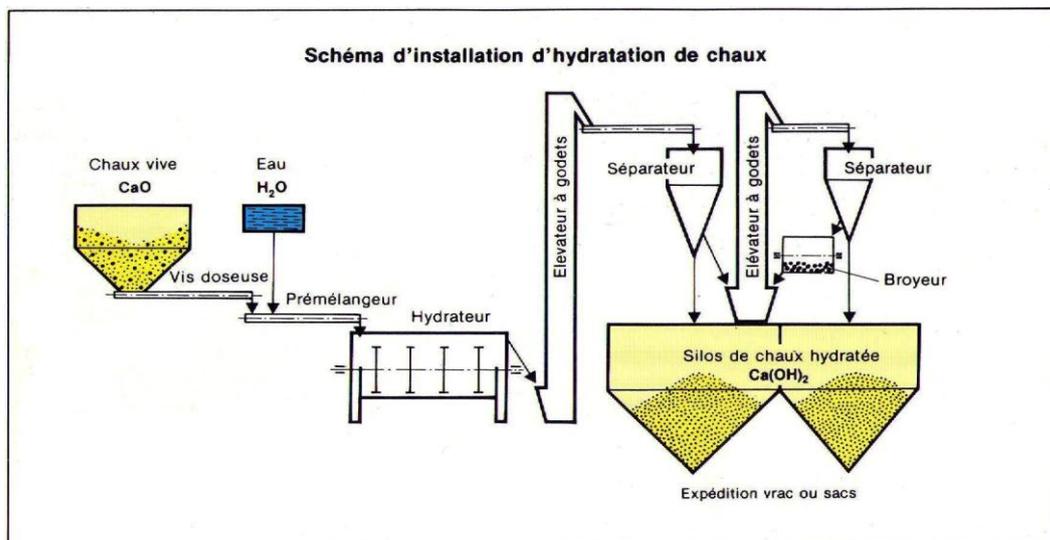


Fig. 3.13- Schéma de principe d'un hydrateur à chaux (Claude, 1994).

Dans l'hydratation par voie sèche : la chaux vive, de calibre inférieur à 10 mm avec une quantité d'eau suffisante et, au besoin ajustée, pour assurer l'hydratation et l'évacuation de la chaleur dégagée par la réaction, sont introduites dans l'hydrateur. Certaines particules de chaux ne réagissent pas à l'hydratation : il peut s'agir d'impuretés, mais aussi de particules de calcaires non transformés en chaux vive ( les « incuits ») ou inversement des particules de chaux vive trop cuite (les « surcuits »). Cet ensemble forme ce qui appelé le « grappier » qui est éliminé après broyage de ses éléments grossiers. A la sortie de l'hydrateur, la chaux éteinte est introduite dans un sélecteur où elle subit une sélection granulométrique (Herrier G. et Al, 2010).

Dans *l'hydratation par voie humide* : la chaux vive est hydratée avec un excès d'eau, on obtient soit de la pâte à chaux, soit du lait de chaux lorsque la concentration en matière sèche est inférieure à 45 %. La pâte à chaux peut être obtenue par hydratation de chaux en roche. Le lait de chaux peut découler de la mise en suspension de la chaux hydratée dans l'eau. Dans tous ces cas de préparation la qualité de l'eau utilisée est primordiale.

### 3.5.5. Contrôles qualité

Ils sont nécessaires, depuis la carrière, afin d'assurer une qualité constante au niveau des impuretés.

- ✓ La qualité de la chaux vive est essentiellement caractérisée par :
  - ❖ Sa réactivité ou vitesse d'extinction à l'eau ;
  - ❖ Son degré de cuisson avec la teneur en CO<sub>2</sub> résiduel ;
  - ❖ Sa teneur en CaO actif.
- ✓ La qualité de la chaux hydratée est caractérisée par :
  - ❖ Sa finesse ;
  - ❖ Sa stabilité (absence de chaux vive) ;
  - ❖ Sa pureté [CO<sub>2</sub> résiduel, Ca(OH)<sub>2</sub>].

Bien qu'étant une réaction très simple, la décarbonatation du calcaire est un processus complexe de par le grand nombre de paramètres, tant physiques que chimiques et thermiques, susceptibles d'influencer son déroulement et modifier les propriétés du produit final (*Herrier G. et Al, 2010*).

## CHAPITRE 4 - QUELQUES SPECIFICATIONS D'USAGE ET APPLICATIONS DES CARBONATES

### 4.1. Cas des calcaires et dolomies crus

Le calcaire, ou « limestone » en anglais, qui se traduit littéralement par « pierre à chaux » (c'est dire le lien étroit qui existe entre les deux matériaux), constitue le point de départ obligé de la fabrication de la chaux. Il n'en reste pas moins réservé à d'autres usages comme la fabrication du ciment ou dans l'industrie chimique (fabrication de la soude ou du gaz carbonique). Pour certaines qualités (pureté surtout), le calcaire grossièrement concassé appelé « castine » intervient en sidérurgie comme fondant des impuretés associées au minerai de fer. Mais son usage est plus largement répandu dans le domaine de la construction : bâtiment, travaux publics ...

Ici, la gamme entière des carbonates - allant de la dolomie au calcaire plus ou moins marneux - est utilisée à l'état brut, sous forme de blocs et morceaux (dimension d'envergure dépassant 125 mm et masse n'excédant pas les 15 tonnes) secs, ou plus ou moins associés à des liants pour former des enrochements de digues, retenues, gabions et autres édifices. Mais ses qualités telles que résistance, dureté peu élevée en font une pierre de taille servant à réaliser diverses constructions, des murs de façade d'extérieur et d'intérieur, ou même des sculptures. L'aspect décoratif, ornemental peut être recherché lorsque l'on rencontre des variétés diversement teintées et qui présentent un bon poli.

De même, les marbres - roches métamorphiques à base de  $\text{CaCO}_3$  - aux applications multiples, offrent des qualités comparables voire supérieures, mais sont généralement peu propices à la fabrication de chaux.

Par ailleurs, les calcaires plus ou moins marneux, associés à des quantités variables d'argile (près de 20 %) servent à fabriquer des liants hydrauliques tels que le ciment « Portland » artificiel (CPA) et d'autres variantes.

Toujours à l'état naturel, le calcaire plus ou moins dolomitique, de bonne cohésion, peut être transformé, après un broyage adéquat, en granulats utiles dans le domaine de la construction, du génie civil... Ses dimensions maximales n'excèdent pas 125 mm. S'il est pur et plus finement réduit il formera une catégorie appelée « *carbonate de calcium* », (ou « *carbonate de magnésium* » si la roche de départ est une dolomie pure), connue pour ses nombreuses applications... La fiche technique suivante (Fig. 4.1) présente l'un des carbonates de calcium (ici l'UF-5 commercialisé par l'unité ENG du Khroub). Des données physico-chimiques et quelques usages de ce carbonate de calcium ultra fin y figurent.

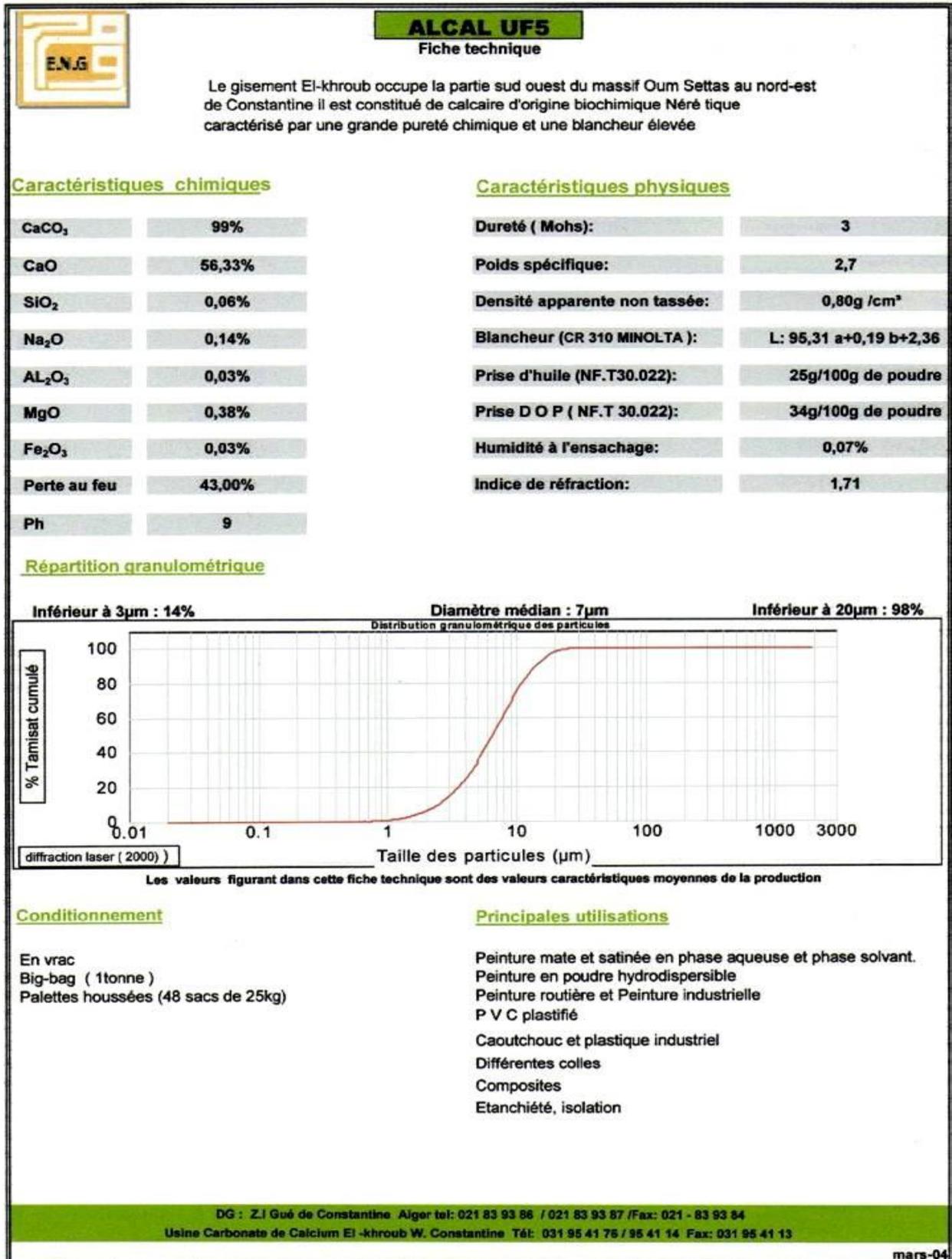


Fig. 4.1- Fiche technique carbonate de calcium UF5 –ENG El Khroub.

Les roches carbonatées servent également :

- comme matériau en sculpture (technique de la taille directe) ;
- comme roche à bâtir utilisée dans la construction : La taille de pierre est un des métiers de la restauration des monuments historiques ;
- comme matériau d'empierrement de la voirie : macadam, graves calcaires, matériaux routiers, ballast de chemin de fer...;
- comme sable et granulats dans la fabrication des bétons ; dans les enrobés bitumineux pour les calcaires les plus durs ;
- comme complément alimentaire en aviculture surtout s'il est pur...

## 4.2. Cas des granulats

### 4.2.1. Quelques spécifications

L'importante application de ces matériaux dans *le domaine de la construction et du génie civil* incite à rappeler les spécifications les plus recommandées à leurs usages.

Il s'agit des granulats provenant de masses carbonatées naturelles. Ces roches dures sont débarrassées des éléments nuisibles (comme les argiles), préalablement ou en cours de leur passage dans l'atelier de fragmentation. Les appareils de fragmentation comportent généralement plusieurs stades de réduction permettant de ramener le produit aux dimensions ou classes granulométriques souhaitées. Pour certaines applications ces produits naturels peuvent être mélangés à des granulats artificiels (laitier de hauts fourneaux, bétons de démolition...). Les mélanges sont régis par des normes appropriées.

En fonction de leurs caractéristiques physico-mécaniques et de leurs destinations, les granulats sont utilisés séparément ou associés à un liant hydraulique.

Il est souvent nécessaire de connaître la granularité ou distribution dimensionnelle des grains d'un granulats, notamment lors de la confection des bétons. C'est l'analyse granulométrique qui permet de visualiser la répartition granulaire au moyen de courbes granulométriques (La figure 4.1 précédente en montre un cas de figure).

Il existe trois classes granulaires principales (*Dupont et Al., 2010*) caractérisées par les dimensions extrêmes **d** et **D** des granulats rencontrées [où *d* est la plus petite dimension et *D* la plus grande dimension des grains dans une même classe granulaire :

- Les sables où  $d = 0$  et  $2 \leq D \leq 6,3$  mm,
- Les gravillons  $d \geq 1$  mm et  $2 \leq D \leq 90$  mm,
- Les graves  $d \approx 0$  et  $2 \leq D \leq 90$  mm, (mélange de pierres cassées et de cailloux)

Les fines constituent la fraction granulaire passant au travers du tamis de 0.063 mm (-200 mesh dans la classification américaine).

Il peut être utile dans certains cas d'écrire la classification suivante (généralement admise pour tous types de granulats carbonatés ou non), présentée dans le **Tableau B.1 annexé**

Remarque: Par souci d'homogénéisation des normes, la dimension inférieure des fines admise aujourd'hui dans beaucoup de pays est *0.063 mm* (-200 mesh dans la classification américaine) au lieu de *0.08 mm*.

Les granulats calcaires satisfont aux exigences techniques de la demande courante : bétons hydrauliques et viabilité. La plupart donne de bons *matériaux routiers* mais leur emploi pour la réalisation des revêtements de chaussées reste limité parce qu'ils sont sensibles au polissage et cela d'autant plus que leur pâte est plus fine et que leur pureté est plus grande.

Les caractéristiques principales de ces matériaux se rapportent autant à *leurs qualités intrinsèques* qu'aux *soins mis en œuvre* durant leur préparation. Elles font l'objet d'essais normalisés (Gadiri, 2009). Retenons avec **Dupont et Al, (2011)** :

**a)- La granularité**, ou distribution dimensionnelle des particules d'un granulat.

Elle exprime un caractère géométrique décisif car permettant d'ajuster la compacité d'un mélange en jouant sur les volumes de particules de tailles différentes à introduire dans ce mélange. Ce paramètre influence nombre de propriétés des bétons hydrauliques et des produits routiers parmi lesquels la teneur en liant. En outre, une proportion importante de fines dans un mélange augmente sa sensibilité à l'eau, ce qui réduit sa résistance mécanique et sa résistance au gel-dégel.

L'analyse granulométrique permet à partir du tracé de la courbe granulométrique de visualiser la répartition granulaire d'un échantillon de granulat. L'essai est réalisé dans une colonne de tamis dont l'ouverture des mailles est à décroissance en progression géométrique. Les classes granulaires de chaque tamis sont pesées séparément, elles représentent des proportions de particules pour une dimension donnée. Le tout est exprimé sur un graphique. L'essai et son mode opératoire sont normalisés (normes **NF EN 933-1**, **NF EN 933-2**) .

Notons que la proportion massique de fines (« passants » au tamis de 0.063 mm et celles rejetées lors du lavage préalable de l'échantillon) définit « la propreté » du granulat.

D'autres techniques alternatives à cet essai sont maintenant utilisées : procédé optoélectronique, granulomètre à LASER pour les fines (cas des carbonates de Ca et de Mg) et certaines argiles, sédimentométrie...

**b)- Coefficient d'aplatissement (FI)**:

Ce paramètre qualifie la proportion pondérale de particules plates d'un granulat. Son accroissement a pour effet de réduire la compacité d'un mélange. La mauvaise orientation des

particules peut être préjudiciable dans certaines applications comme au niveau des enduits superficiels.

L'essai de référence (norme **NF EN 933-3**) consiste à séparer par tamisage successifs (tamis et grilles à fentes) les particules plates de chaque fraction granulométrique contenue dans la masse initiale de l'échantillon et d'en déduire par calcul le coefficient d'aplatissement **FI** en%. *Plus FI est faible, meilleur est le granulat.* Ce coefficient peut aussi être mesuré par méthode optique.

### c)- **Qualité des fines :**

Ce paramètre permet d'évaluer le contenu en substances argileuses, lesquelles présentent de nombreux inconvénients, parmi lesquels des *gonflements* par absorption d'eau ou par réaction chimique avec d'autres substances du mélange (béton notamment), ou encore de modifier les caractéristiques *des surfaces spécifiques* et le *pH du milieu* au point de *rendre médiocre l'adhésion liant /granulat*.

Cette qualité est mesurée à l'aide des essais *d'équivalent de sable* ou *de bleu de méthylène*, effectués sur des sables non lavés.

- **Essai d'équivalent de sable (ES)** : il est réalisé sur environ 120 g de la fraction 0/2 mm de sables et graves ni lavés, ni séchés. Il consiste à faire sédimenter l'échantillon dans une solution floculante de chlorure de calcium pendant un temps donné (20 mn), de mesurer les hauteurs de sédimentation (sédiment et sédiment + floculat) et d'en déduire par le rapport de ces hauteurs le coefficient ES (en %). La qualité des fines d'un sable est d'autant meilleure qu'elles sédimenteront, donc que cette valeur ES est élevée. Toutefois, cet essai a l'inconvénient de pénaliser les sables à haute teneur en fines naturelles largement utilisés dans les matériaux de construction, fines qui n'ont pas la même nocivité que celles des argiles.

- **Essai de valeur de bleu (MB)** : il est plus sélectif que le précédent vis-à-vis des argiles. L'essai est réalisé sur la même fraction granulaire et consiste à doser l'adsorption du bleu de méthylène par l'argile contenue dans du sable mis en suspension dans de l'eau distillée. La valeur de bleu MB s'exprime en cm<sup>3</sup> de bleu de méthylène par gramme de sable. Plus cette valeur MB est faible et moins les fines du sable sont nocives.

Ces deux essais qui mesurent la propreté des sables sont régis par les normes **NF EN 933 8** et **NF EN 933 9**.

Des caractéristiques intrinsèques : mécaniques, chimiques, thermiques et d'altérabilité, héritées de la ressource dont proviennent les granulats, figurent au même titre que certaines caractéristiques physiques (masses volumiques, coefficient d'absorption d'eau...).

Les caractéristiques mécaniques mesurées sur les granulats sont liées aux contraintes qu'ils subissent durant toutes les étapes qu'ils traversent jusqu'à leurs utilisations. Les caractéristiques chimiques des granulats sont liées à la présence de substances comme la

silice, des sulfates solubles ou encore des chlorures qui se sont avérés nuisibles dans certaines applications. Enfin, les caractéristiques thermiques et d'altérabilité se limitent à la résistance au gel-dégel. Une mauvaise résistance au gel peut entraîner une fissuration et une nouvelle division du granulat en petits morceaux.

**d) - Essai micro Deval (MDE) ou résistance à l'usure :**

Cet essai consiste à appliquer un cycle d'usure par attrition en présence d'eau à deux éprouvettes contenant chacune une quantité déterminée de gravillons calibrés. Les gravillons de chaque éprouvette sont tour à tour introduits dans un récipient cylindrique tournant autour de son axe, en présence d'eau et d'une charge de billes abrasives (*Dupont et Al.*, 2010). L'appareillage et quelques paramètres relatifs à l'essai sont indiqués en annexe B.2.

Ces gravillons subiront un nombre déterminé de rotations à vitesse constante avant tamisage à une dimension donnée puis pesée après séchage. Enfin le *coefficient micro-Deval* (MDE) est déduit par calcul (Fig. IV.3) et c'est la valeur moyenne obtenue pour les deux éprouvettes qui sera prise en considération. Ce coefficient *MDE* revêt toute son importance pour évaluer l'usure des granulats dans les travaux routiers. Plus sa valeur est élevée, plus le granulat est résistant. L'essai est régi par la norme **NF EN 1097-1**.

**e) - Essai Los Angeles (LA) ou résistance à la fragmentation :**

Cet essai caractérise la résistance au choc d'un granulat. L'échantillon est préparé de façon presque analogue à celui de l'essai précédent. Mêlé à des corps broyants, il est soumis à un broyage à sec dans un cylindre tournant autour de son axe dans des conditions appropriées (rappelant les broyeurs à boulets (Schéma de l'appareillage et quelques paramètres de mise en œuvre, indiqués en annexe B.3)...

Comme précédemment, le tamisât est pesé et le coefficient **LA** est déduit par calcul. Un granulat résiste d'autant mieux à la fragmentation par choc que ce coefficient **LA** est faible. L'essai est régi par la norme **NF EN 1097-2**.

**f) - Coefficient de polissage accéléré : (PSV) et RPA:**

Cet essai mesure la résistance au polissage des gravillons. L'essai consiste à soumettre successivement deux séries d'éprouvettes de gravillons à deux cycles de polissage simulant l'effet du trafic, puis à mesurer la rugosité résiduelle des gravillons à l'aide d'un pendule de frottement ...Un granulat résiste d'autant mieux au polissage accéléré que cette valeur **PSV** est élevée. Ce coefficient est régi par la norme **NF EN 1097-8**. Il existe toutefois une procédure de polissage alternative appelée résistance au polissage accéléré ou **essai RPA**,

(Norme **XP P 18-580**), moins contraignant dans sa mise en œuvre et ses délais que le précédent.

#### 4.2.2. Autres caractéristiques

D'autres caractères peuvent être mis en évidence, ils sont physiques (masse volumique réelle ou apparente, absorption d'eau, compacité, porosité, résistance au gel/dégel...) ou chimiques (réactivité aux alcalis, teneur en sulfates solubles,). Ils sont nécessaires, voire obligatoires pour certaines applications.

Les caractéristiques des granulats dépendent de la nature et de la qualité du matériau d'origine d'une part, et de leurs conditions d'exploitation et d'élaboration d'autre part. Qu'elles soient d'ordre géotechnique, chimique, morphologique ou de propreté, ces qualités doivent rester régulières lors des livraisons. Autant le fournisseur que l'utilisateur est tenu par une telle exigence pour une gestion optimale de tels matériaux.

#### 4.3. Cas des carbonates finement fragmentés et leurs applications

Les carbonates de calcium et de magnésium chimiquement purs et de blancheur élevée connaissent également de nombreuses applications pour peu qu'ils soient réduits à des dimensions adéquates allant de quelques millimètres à quelques microns.

Pour les variétés de carbonate de calcium commercialisées par *ENG, El Khroub* - à l'exemple de celui de la fiche technique (Fig. 4.1) – les caractères mis en évidence sont favorables à de nombreuses applications. Citons les utilisations les plus courantes comme:

- charge minérale pulvérulente dans divers produits industriels (plastiques, peintures, colles, dentifrices, récurrents, cosmétique, papier...);
- fondant dans la fusion du verre (en sable) et dans la fusion des métaux ferreux (en castines);
- enduits et crêpis;
- alimentation animale (bétail, volaille);
- amendement calcique agricole pour lutter contre l'acidification du sol;
- mastics, diverses industries, céramique, carreaux granito...

Quant à la dolomie crue, broyée, elle trouve des applications en sidérurgie dans les unités d'agglomération, dans le traitement des eaux potables et industrielles, ou en agriculture dans la fabrication des engrais calco-magnésiens ou encore en construction comme ajout pour la fabrication des moquettes...

#### 4.4. Utilisations de la chaux

Les applications de la chaux sont innombrables, quelques unes ont été évoquées avec les spécifications précédemment énoncées. Pour la plupart des pays développés, la sidérurgie consomme à elle seule près de la moitié de la chaux fabriquée. Cinq secteurs viennent ensuite dans un ordre qui peut légèrement varier d'un pays à l'autre. Ce sont: l'agriculture, les industries chimiques, les routes, le traitement des métaux non ferreux et la lutte contre la pollution (traitement des eaux, des fumées, des déchets) qui consomment à eux seuls plus de 80% du reste. Les autres utilisateurs sont la papeterie, la construction, les exportations (cas des pays développés) auxquels vient s'ajouter une très grande variété de débouchés.

##### 4.4.1. En sidérurgie

La chaux (calcitique) intervient dans la chaîne d'agglomération du minerai de fer mais surtout dans la transformation de la fonte en acier, agissant comme fondant des impuretés dans les convertisseurs et les fours électriques. Les principales qualités requises sont sa pureté élevée et sa haute réactivité. Livrée à une granulométrie adéquate, cette chaux intervient à raison de *50 à 70 kg par tonne d'acier*. Elle peut être avantageusement remplacée par de la chaux dolomitique à cause du rôle protecteur qu'elle apporte cette dernière aux revêtements réfractaires. Cette protection est renforcée par l'usage de dolomie frittée. Ces variétés limitent l'action agressive des scories sur le garnissage. Elles interviennent en quantités moindres (20 à 50% des ajouts requis). (*Syndicat National des Fabricants de Ciments et de Chaux, Fr.*)

Rappelons que le calcaire ou castine est préalablement utilisé dans les hauts fourneaux comme fondant et purifiant du minerai de fer.

##### 4.4.2. En métallurgie (métaux non ferreux)

La chaux est diversement utilisée, faisant appel dans chaque cas à l'une ou l'autre de ses propriétés (*Claude., 1994*).

- **dans la production de l'aluminium** : la chaux est utilisée pour produire une « lessive » concentrée de soude permettant la mise en solution de l'alumine ( $Al_2O_3$ ) à partir de la bauxite (minerai d'aluminium). Alumine pure qui servira à produire par électrolyse de l'aluminium métal dans le procédé Bayer et autres variantes.
- **Dans la production du magnésium** : la chaux intervient dans le procédé électrolytique qui consiste à extraire le magnésium à partir de l'eau de mer suite à diverses réactions utilisant « le lait de chaux ». Elle intervient aussi dans un autre procédé (le procédé Pidgeon) où la magnésie ( $MgO$ ) est réduite par du silicium (sous vide et à haute température) en présence de chaux vive.
- La chaux permet aussi *d'isoler le calcium*. Cette application a montré des limites.
- La chaux est utilisée *en flottation des minerais* renfermant le cuivre, le plomb, le zinc ou encore le nickel ou l'uranium. Elle agit comme régulateur de pH, ajustant la valeur de celui-ci y compris pour certains cas d'extraction de métaux précieux (*Herrier et Al, 2010*)

#### 4.4.3. Pour la protection de l'environnement

Les applications de la chaux dans le domaine environnemental sont nombreuses et en constante évolution. Ses propriétés caustiques, flocculantes, son pouvoir coagulant, sa forte réactivité et d'autres spécificités en font un produit de choix pour le traitement des eaux de consommation domestiques et industrielles, pour l'épuration des eaux usées et des fumées industrielles polluantes :

a) **dans le domaine des eaux de ménage** : la chaux est surtout utilisée pour décarbonater les *eaux dures* ou « eaux calcaires » en éliminant les bicarbonates de calcium et de magnésium qu'elles contiennent. Signalons le côté paradoxal d'un tel usage, qui se sert d'un dérivé calcaire-la chaux- pour éliminer les composés calcaires présents dans l'eau ! (Claude-1994). La figure 4.3 donne un schéma-type de la préparation de l'eau à usage domestique ou industriel.

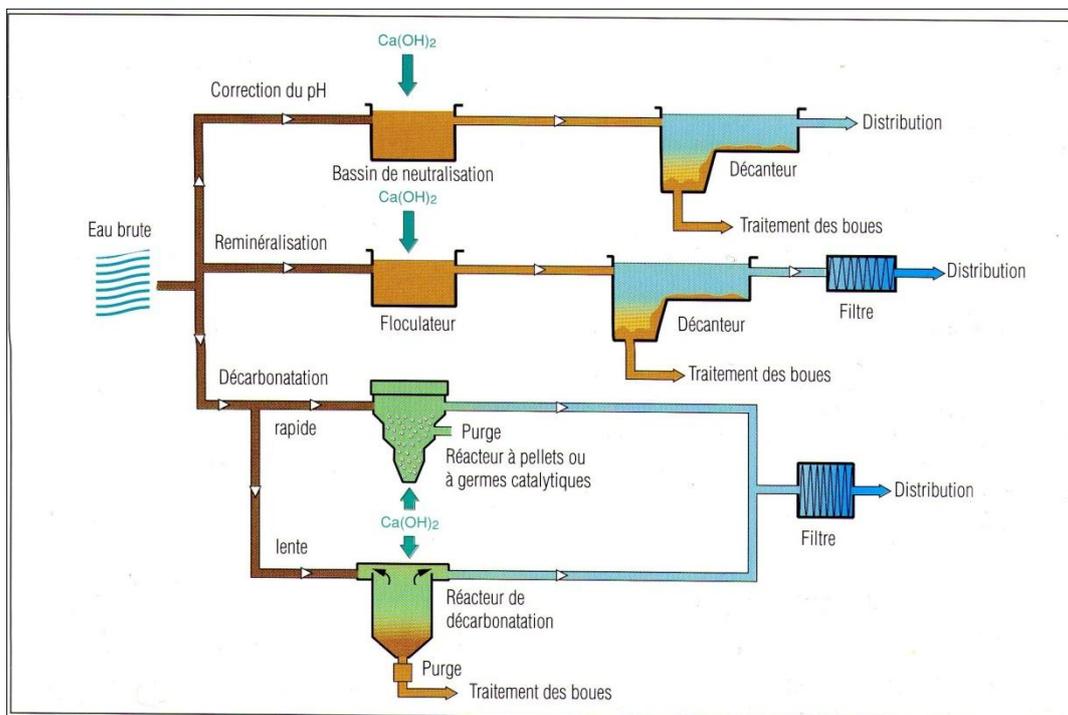


Fig. 4. 3- Schéma de préparation de l'eau à usage domestique ou industriel (LHOIST).

En réalité, l'apport de chaux transforme les bicarbonates dissous dans l'eau en carbonates insolubles qui précipitent et que l'on peut éliminer. La « dureté » de l'eau peut provenir aussi de la présence d'autres sels de calcium (sulfates, chlorures) auquel cas il faut associer à la décarbonatation un traitement au carbonate de sodium ou un adoucissement sur échangeur d'ions pour précipiter les sels de calcium et les éliminer.

Note : la concentration du calcaire dans l'eau potable ou *dureté* s'exprime en « degré français ». Un degré correspond à 4 mg/l de Ca. La présence de calcaire dans l'eau ne présente

pas d'inconvénient pour la santé, bien au contraire. Il n'y a donc pas de teneur maximum réglementaire.

*b)* La chaux intervient à d'autres titres pour abaisser l'acidité, pour clarifier les eaux qui contiennent des matières en suspension, pour éliminer des micro-organismes pathogènes ou pour précipiter des substances nocives ou encore pour « reminéraliser » une eau trop douce

*c) dans le domaine des eaux industrielles :* la décarbonatation joue un rôle prépondérant. Elle empêche la formation de tartre dans les chaudières et les circuits thermiques.

*d) dans le domaine des eaux usées :* l'épuration de ces eaux fait appel à trois catégories de procédés :

- **les procédés mécaniques** qui permettent d'éliminer les particules solides encombrant grâce à des grilles de filtrage, des bassins de décantation, des cuves de flottation ou autres...
- **les procédés biologiques** qui font appel à des micro-organismes à savoir des bactéries aérobies pour dégrader les matières organiques contenues dans les eaux usées.
- **les procédés physico-chimiques** qui permettent de séparer les matières en suspension et les sels dissous dans l'eau par précipitation, floculation ou coagulation.

En raison des exigences en matière de qualité d'épuration, la chaux joue un rôle beaucoup plus actif que celui permis par les autres méthodes car elle agit :

- > *d'abord comme agent de coagulation et de floculation*, seule ou en association avec d'autres produits. Ce qui permet d'agglomérer les particules organiques en suspension dans l'eau,
- > ces mêmes traitements permettent *d'éliminer les phosphates* issus de détergents modernes et *limitent aussi la prolifération des algues* dans les réseaux et installation de distribution des eaux,
- > elle détruit ou inactive la plupart des bactéries et virus. Ce rôle de désinfectant efficace est lié à sa forte alcalinité,
- > cette même alcalinité lui permet d'ajuster le pH afin de rendre l'eau compatible avec des traitements ultérieurs,
- > elle agit sur les effluents industriels en éliminant les produits toxiques et les sels de métaux lourds...

*d) dans le domaine des boues résiduaires (Fig. 4. 4)*

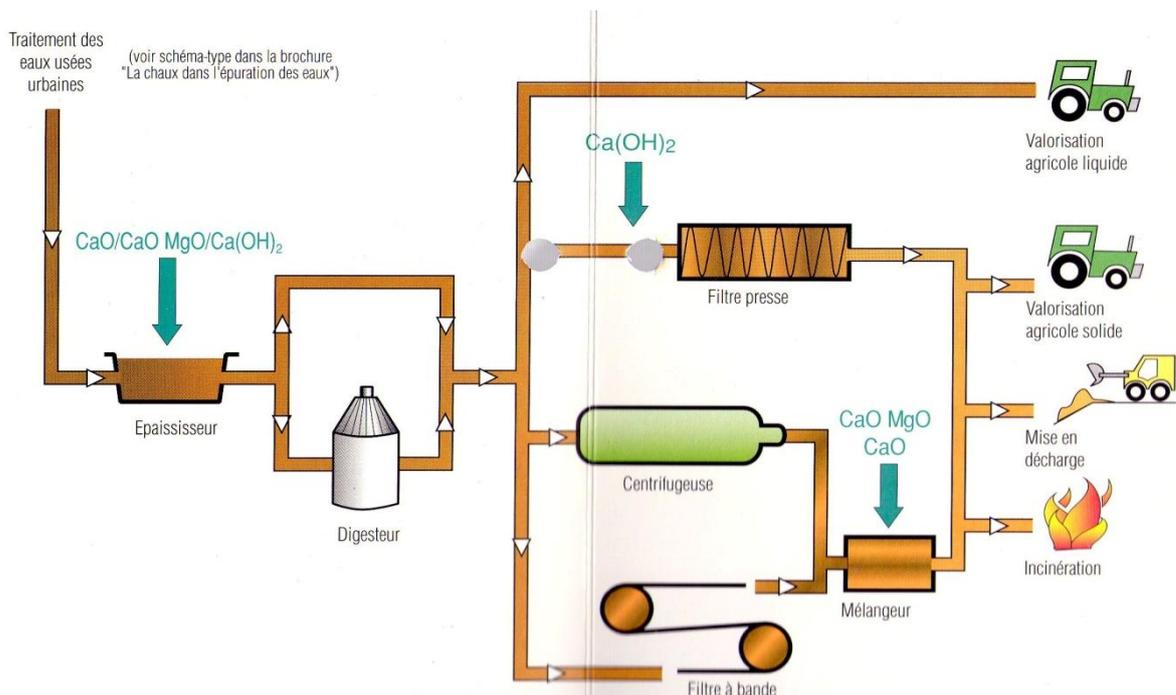


Fig. 4. 4- Schéma-type de traitement des boues (LHOIST).

Les polluants retirés des eaux potables ou des eaux résiduaires se concentrent en fin de parcours dans des boues dont il faudra se débarrasser dans des conditions à la fois hygiéniques et économiques. Ils doivent subir une série d'opérations : déshydratation, stabilisation, stérilisation grâce à l'action de la chaux qui les valorisera au point de leur trouver quelquefois des utilisations. Les boues riches en chaux peuvent servir comme amendements de sols soit directement, soit après compostage avec les ordures ménagères solides. Elles peuvent aussi être calcinées pour régénérer la chaux utilisée dans le traitement.

#### 4.4.4. Dans le domaine des fumées industrielles

La chaux intervient dans la désulfuration des rejets gazeux industriels nuisibles qui sont à l'origine des pluies acides (surtout si les gaz proviennent du fuel et/ou du charbon). Elle développe une grande surface spécifique et un volume poreux important qui lui permettent la captation des composés acides contenus dans ces rejets et leur transformation en solides pour être évacués dans les installations de dépoussiérage. Sont concernés les composés tels que le dioxyde de soufre, l'acide chlorhydrique ou l'acide fluorhydrique. La chaux est soit injectée sous forme de lait de chaux, soit sous forme de chaux éteinte pulvérulente. Parmi les grands producteurs de chaux, le groupe LHOIST (Belgique) a développé différents procédés (à sec, semi-sec, semi-humide, humide...)

#### 4.4.5. Dans l'agriculture

L'usage de la chaux (voire du calcaire et de la dolomie) comme amendement pour corriger l'acidité des sols est une pratique connue depuis longtemps en agriculture. Dans la plupart

des cas, l'acidification des sols est une tendance naturelle qu'il faudra corriger tôt ou tard car pouvant entraîner une diminution de la fertilité vis-à-vis des cultures.

L'acidité empêche l'alimentation des plantes en éléments nutritifs comme le phosphore et au contraire peut libérer des éléments dont l'excès peut devenir toxique. Elle inhibe la vie microbienne des sols en perturbant l'ensemble de l'activité biologique associée à la nutrition des plantes.

La chaux efficace à plus d'un titre que le calcaire ou la magnésie (*Claude, 1994*) permet de restaurer l'équilibre des sols et favoriser ainsi la vie microbienne. L'autre avantage est celui d'améliorer la structure des sols argileux ou limoneux devenus lourds, plastiques et difficilement « travaillables » au cours du processus d'acidification. Le calcium et le magnésium apportés par la chaux sont aussi des éléments nutritifs, indispensables à la croissance des plantes, qui compensent les carences du sol naturel.

#### 4.4.6. Dans les constructions et les routes

Dans beaucoup de pays, ce domaine est le deuxième consommateur de chaux après la sidérurgie. Elle intervient à plusieurs titres (*Lhoist, 1992-2006 ; Claude J., 1994; Herrier G. et Al., 2010*) :

- ▶ comme enduit ou mortier de construction, où elle retrouve son rôle historique essentiel ;
- ▶ comme matériau de construction, dans la fabrication des briques silico-calcaires, des bétons poreux dits bétons cellulaires ;
- ▶ comme élément constitutif du verre, dans la verrerie ; ainsi que pour élaborer les fibres de verre textile et d'isolation ;
- ▶ comme constituant des revêtements pour améliorer la qualité des sols naturels ou afin de les stabiliser. Un premier rôle est celui d'assécher assez rapidement les sols (permettant aux engins d'accéder aux chantiers en saisons pluvieuses) et surtout de constituer des assises de chaussées durables, avec des caractéristiques routières intéressantes. Ici outre l'assèchement, la chaux peut apporter une amélioration de la porosité, de la structure à la suite de réactions complexes.
- ▶ Comme constituant des mélanges bitumeux ou avec les matériaux pouzzolaniques.

#### 4.4.7. Autres utilisations

Les emplois déjà mentionnés sont les plus importants. Il en existe beaucoup d'autres, qui ne représentent pas toujours un tonnage considérable mais où la chaux joue un rôle essentiel. Il ne peut pas être question de les mentionner tous étant donné leur nombre et leur diversité. Citons en seulement quelques uns (*Herrier et Al., 2010*) :

- *Dans l'industrie papetière* : la chaux, et même le calcaire pulvérisé, interviennent à plusieurs niveaux :

- en régénérant la soude caustique de la pâte à papier (procédé Kraft) ;
- en neutralisant par le lait de chaux des eaux acides issues de la fabrication de la pâte par le procédé au bisulfite ;
- en produisant l'hypochlorite de calcium pour le blanchiment ;
- en fabricant du carbonate de calcium précipité à partir de lait de chaux ou **PCC** (Precipitated Calcium Carbonate). Le PCC existe sous plusieurs formes cristallines. Il est utilisé principalement comme charge minérale (filler) en substitution de la cellulose, assurant au papier son épaisseur, ainsi que des propriétés de blancheur et d'opacité. Une autre forme cristalline du PCC est appliquée en surface du papier pour lui conférer des propriétés de brillance, de la résistance mécanique et favoriser l'impression.

Un des processus de fabrication du PCC est donné en **annexe B-3**.

Par ailleurs, ce produit transformé en particules ultra fines : les nano particules trouve d'intéressantes applications dans les nanotechnologies notamment en rapport avec les industries du papier, des plastiques (Romuald Babou K., 2010)...

- *Dans l'industrie chimique* : production de soude caustique, fabrication des sels de déneigement, production des glycols, saponification des huiles, fabrication des phosphates, production de magnésie...

- *Dans les industries alimentaire et sucrière* : dans l'industrie laitière et en sucrerie pour réduire l'acidité et coaguler des impuretés, dans l'industrie pâtissière (préparation de gélatines), pour la conservation des fruits et légumes, pour la purification de l'acide citrique...

- *Dans l'industrie pétrolière*, elle sert dans le processus de fabrication des produits pétroliers comme adjuvant dans la composition des huiles de raffinage. En cours de forage, elle est utilisée pour décarbonater les eaux de forage ; elle rentre aussi dans la composition des boues de forage.

- Dans la *tannerie* et la *mégisserie*, en ajout dans des bains pour débarrasser les peaux brutes de leurs poils. Ici sont mis en jeu les caractéristiques caustiques et floculantes.

- La chaux est un *désinfectant* connu et apprécié pour son efficacité depuis longtemps ; ses usages domestiques sont variés et loin d'être négligeables...

- Dans l'industrie pharmaceutique...

Cette énumération des applications est loin d'être exhaustive, des détails tant sur la chimie des carbonates, sur les technologies de leurs transformations en chaux et sur leurs usages sont donnés par de nombreux auteurs. Parmi ceux-ci citons en particulier Boyton., 1980 ; Harben-1991; Harben et Al.- 1996, 2001 ; Oates-1998 ; Guedras-1957)... ou des ouvrages collectifs tel que Calcium carbonate - 2001 ; (des sites web : www.BREF – 5/2010) ; www.Ineris-fr.) à côté d'articles dans les revues spécialisées dont certains sont cités en bibliographie.

#### 4.4.8. Données utilitaires

Les calcaires et à un degré moindre les dolomies, sont utilisés sous des formes granulométriques diverses en gravier, moellons ou broyés, (carbonates moulus, micronisés). Ils sont aussi utilisés après cuisson en différentes chaux dont les formes chimiques les plus courantes sont les chaux vives et les chaux éteintes. Ces produits naturels ou transformés sont consommés en quantités variables selon les secteurs d'utilisation. Par exemple pour obtenir une tonne de chaux vive marchande il faudra 1.4 t à 2.2 t de pierre à chaux.

Pour certaines utilisations, donnons quelques chiffres qui sont des ordres de grandeur de consommation :

En construction (routes, génie civil, bâtiment...)

01 m<sup>3</sup> de mortier peut contenir 100 kg de chaux, 185 kg de ciment (lui-même à base de calcaire titrant à plus de 80% de CaCO<sub>3</sub>), 1800 à 1900 kg de gravier et 235 kg d'eau.

Un logement demande 100 à 300 tonnes (t) de granulats. Un lycée demande de 2000 t à 4000 t de granulats et 1 km d'autoroute environ 30000 t.

En métallurgie et industrie du verre

Pour une tonne d'acier, il faut 150 kg de calcaire, de 20 kg à 30 kg de dolomie et 50 kg de chaux. Une tonne de verre nécessite entre autres, 300 kg de calcaire et une tonne de soude consomme 1300 kg de calcaire.

En utilisation comme charges (papeterie, peinture, caoutchouc et plastiques, colles...)

Rappelons qu'il y a deux catégories de charges :

- Les charges *inertes* qui permettent d'économiser sur les coûts en substituant partiellement aux substances principales, des substances neutres moins chères, sans diminuer les qualités d'ensemble en deçà des normes fixées.
- Les charges *fonctionnelles*, pour bonifier des qualités existantes rhéologiques et autres (viscosité et onctuosité, masse, couleur, résistance mécanique, etc... ou d'apporter des qualités particulières (rôle de fondant, isolation thermique ou électrique etc...) en tel cas, on peut obtenir en même temps une qualité améliorée et un coût diminué (BRGM, 2000).

01 tonne de papier contient 250 kg à 300 kg de calcaire micronisé (variété GCC), dont l'un des aspects apparaît en agrandissement sous le microscope électronique à balayage – MEB (Fig. voir Chapitre.3.-2) pour faire en particulier la couche de finition. Les PVC (principal consommateur des carbonates de calcium) contiennent de 17 % à 40 % de ces carbonates et il y a plus de 60 % dans les dalles de sol. Les peintures consomment de 10 % à 40 % de carbonates et les mastics jusqu'à 85 %.

Pour l'environnement (traitement des eaux, des boues, des fumées, des déchets ménagers) :

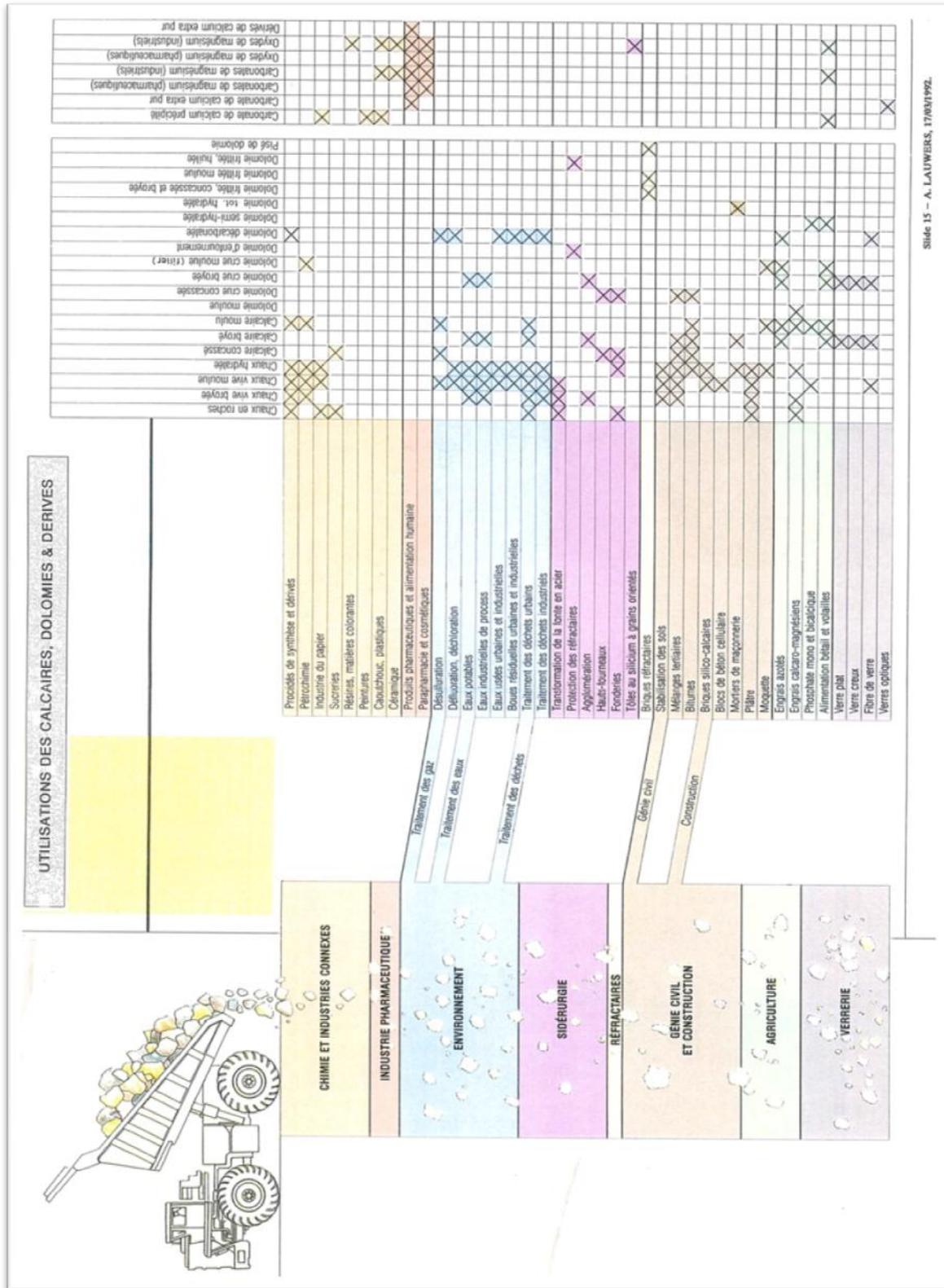
- Un m<sup>3</sup> d'eau potable demande de 50 g à 200 g de chaux pour précipitation des métaux lourds et floculation des boues.

En agro-alimentaire (alimentation humaine et animale, engrais et amendements, sucreries, laiteries, industries pharmaceutiques)

-Il faut 20 kg de calcaire pour fabriquer 100 kg de sucre...La chaux et le carbonate de calcium sont utilisés dans des de nombreuses préparations alimentaires humaines et animales. Le carbonate de calcium est un composant essentiel de la fabrication de dentifrice.

En industrie chimique

Carbonate de calcium et chaux sont utilisés en pétrochimie, pour la fabrication de soude, en tannerie... Une récapitulation sommaire et complémentaire est présentée en figure 4.5



Side 15 - A. LAUWERS, 17/01/1992.

Fig.4.5- Récapitulation d'utilisation des calcaires, des dolomies et de leurs dérivés (LHOIST).

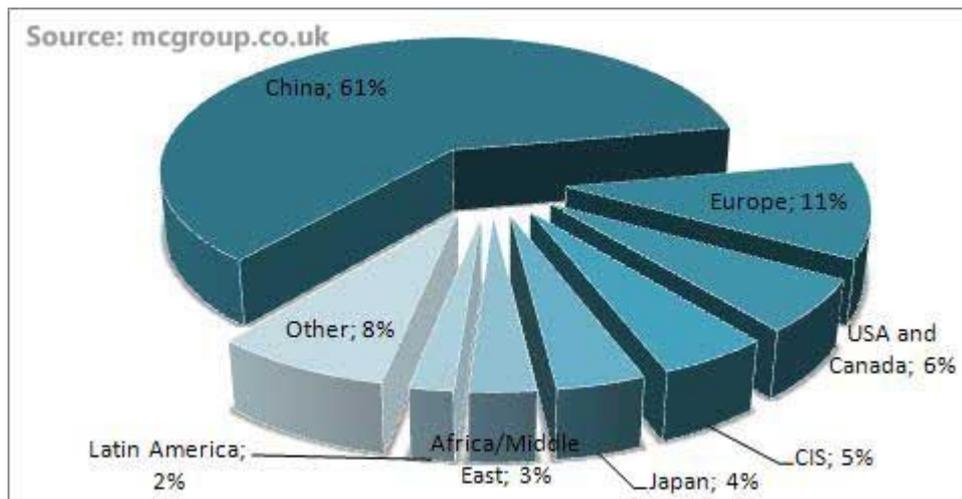
## CHAPITRE V : CARBONATES NATURELS, CHAUX :

### ECONOMIE

#### 5.1. Données de base, production mondiale

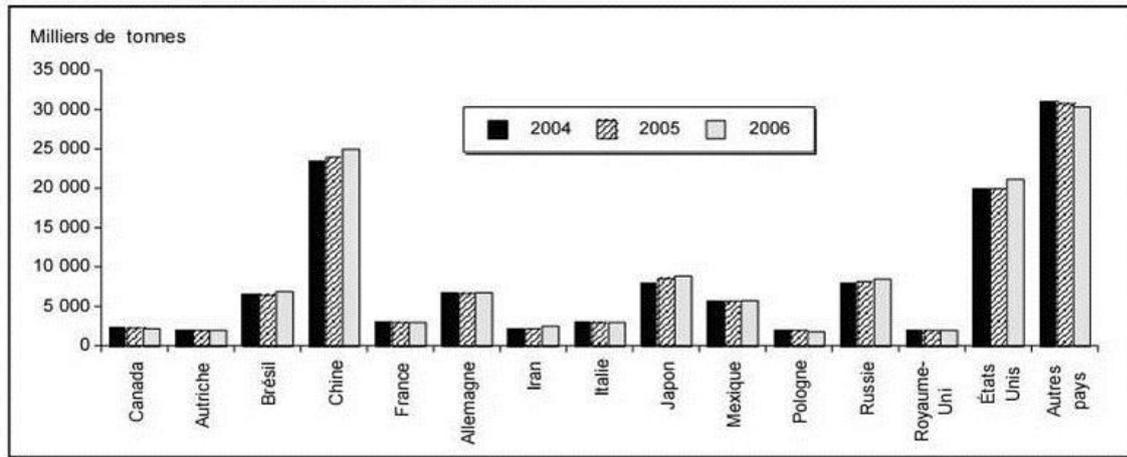
La chaux provient de la cuisson de roches carbonatées (calcaires et dolomies). La bonne qualité de la roche de départ, sa préparation à l'enfournement, son mode de cuisson (dont la durée)- en rapport avec le type d'équipement installé, la maîtrise de sa conduite et la nature du combustible utilisé- ont une importance de premier plan. Ces éléments contribuent à produire différentes catégories de chaux, chacune adaptée à un usage spécifique.

Cette chaux est fabriquée principalement dans les pays développés et-maintenant- de plus en plus -dans certains pays émergents à forte croissance économique (Chine, Inde, Brésil...). Le graphe ci-après (Fig. 5. 1), indique les parts des principaux pays producteurs à fin 2008.



**Fig.5. 1-** Répartition de la production de chaux dans le monde.

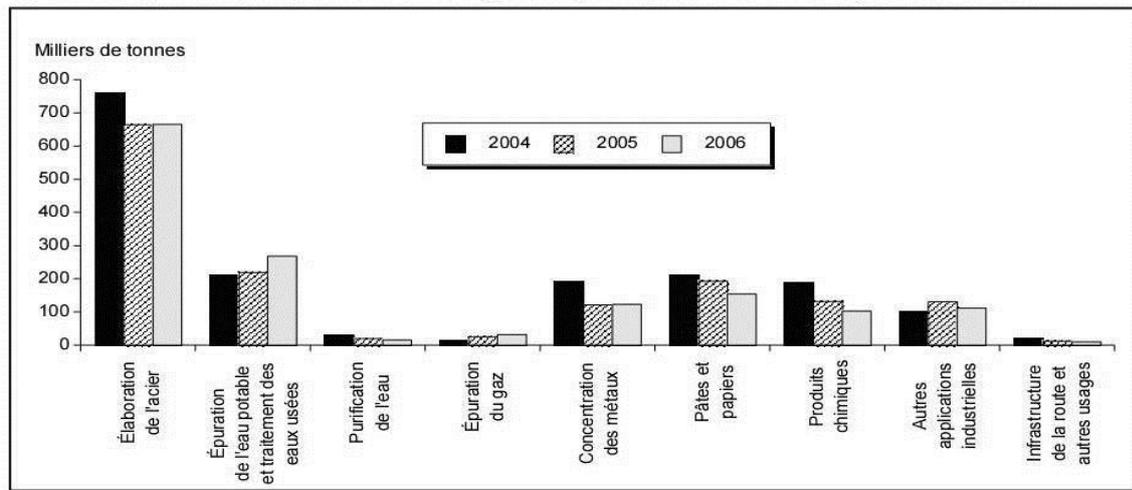
Au cours des années 2000, la production de chaux a fortement augmenté dans le monde, surtout durant la période 2005-2007, stimulée par une forte demande dans les principales industries consommatrices. Cette augmentation a ralenti considérablement en 2008 suite à la crise connue dès cette année sur les marchés européens et américains (sidérurgie, industrie du papier et autres...). La Chine, qui n'a pas connu de ralentissement à cette époque, se place déjà au premier rang des producteurs. En 2008, elle fournissait plus de 60% de la production mondiale. Le graphe ci-dessous (Fig. 5.2) indique les principaux pays producteurs, L'union européenne se placerait en 2<sup>ème</sup> position.



**Fig.5.2-** Principaux pays producteurs de chaux dans le monde. (US Geological Survey).

Dans le reste du monde et particulièrement dans les pays développés : Europe, USA-Canada, Japon, le marché est organisé entre des producteurs régionaux, chacun au service de ses clients consommateurs spécialisés mais locaux. En exemple, le Canada (Fig.5.3)

**Utilisation de la chaux vive et de la chaux hydratée par l'industrie canadienne, de 2004 à 2006**



**Fig.5.3-** Utilisation sectorielle de la chaux au Canada (Ressources naturelles –Canada)

Ce qui fait qu'il y a relativement peu d'échanges mondiaux car la chaux est facilement disponible partout dans ces régions. Cette situation contribue à réduire le coût du transport à la livraison. (US Geological Survey)

De plus, le ralentissement connu dans les pays occidentaux, est lié en partie aux restrictions environnementales imposées depuis le milieu des années 1960, entraînant la fermeture d'installations ne pouvant pas se conformer à de telles restrictions. Dans beaucoup de cas, le coût de mise à niveau des équipements de production et ceux pour le respect de

l'environnement est devenu prohibitif en raison de la vétusté des uns et de l'absence des autres.

Notons que dans les pays émergents-surtout ceux qui connaissent un niveau de développement notable- l'industrie de la chaux peut s'inscrire dans des programmes de développement durable. Dans les cas où les matières premières adéquates, l'énergie et des ressources financières sont disponibles, l'industrie de la chaux est génératrice d'activités de transformations de plus en plus nombreuses, se plaçant à son aval. Le développement de toutes ces activités est indicateur d'une croissance économique appréciable.

Aujourd'hui, la production de chaux a repris sa croissance dans les nouvelles puissances émergentes (Chine, Inde, Brésil). Cette croissance qui est caractérisée par une production plus variée dans les pays occidentaux, reste modérée.

### **5.1.1. Autres spécificités :**

L'industrie de la chaux met sur le marché un produit pondéreux et périssable dont la commercialisation génère une marge bénéficiaire modérée sauf pour les variétés dont la vulnérabilité et le coût d'élaboration sont plus importants.

De plus, cette industrie, pour ne pas être polluante, doit consacrer un investissement supplémentaire pour installer des équipements de lutte contre les effets des pollutions dues aux poussières et aux gaz de cuisson émis. Sans compter qu'il faudra veiller à réhabiliter les sites à la fin de l'exploitation.

Au départ, la matière première doit être disponible en quantité (minimum 50 millions de tonnes) et en qualité ( $\text{CaCO}_3 \geq 95\%$  pour le calcaire et exigences de pureté similaires pour la dolomie). La production de chaux doit se faire à proximité des carrières afin de limiter les coûts de transport.

Rappelons qu'outre les investissements liés à la mise en place des infrastructures de base, les frais de fonctionnement d'une unité de fabrication de chaux peuvent être ramenés- en simplifiant-à quelques centres de coût. Parmi ces derniers, citons : les frais d'acquisition de la matière première, les frais de fonctionnement (main d'œuvre, entretien, consommables, acquisitions diverses...), et autres charges directes et indirectes... Dans beaucoup de pays le coût de l'énergie atteint et dépasse les 50% des frais de fonctionnement.

Le choix de l'équipement de production, la souplesse de sa conduite, la limitation et le contrôle des rejets générés durant les processus de fabrication sont des paramètres clés pour la bonne marche et donc la rentabilité de cette activité... Une production variée, répondant à des normes rigoureuses de fabrication et d'utilisation, améliorent considérablement cette rentabilité.

Mais les avantages liées à l'ensemble des activités que procure ce pôle industriel l'emporte sans doute sur les inconvénients qu'il génère mais qu'il faudra maîtriser.

### 5.1.2. Données récentes sur la production mondiale de chaux :

En 2010, la production en millions de t de CaO et Ca(OH)<sub>2</sub> est estimée à 310 millions de tonnes (310 Mt) dans le monde et moins de 36 Mt dans l'union européenne. Les données pour les principaux autres pays producteurs figurent dans le tableau (5.4) ci-après

Chine	190	Allemagne	6,8
Etats Unis	18	Italie	6,4
Inde	14	Mexique	5,7
Japon	9,4	Corée du Sud	4,0
Brésil	7,7	Turquie	4,0
Russie	7,4	France	3,7

**Tab.5.4-**Principaux producteurs de chaux dans le monde (US geogical survey).

Dans le détail et à titre d'exemple, aux Etats-Unis, le maximum de production a été atteint, en 2006, avec 21 millions de t. La production est assurée dans 73 usines par 31 sociétés dont 10 avec une production captive (par les moyens propres de l'utilisateur) destinée à la purification du sucre ou à la sidérurgie. En 2009, sur une production totale de 15,8 millions de t, la chaux vive a représenté 11,8 millions de t, la dolomie calcinée, 1,8 million de t, la chaux éteinte, 1,7 million de t, la dolomie éteinte, 0,3 million de tonnes. L'importance de ce pôle industriel, véritable moteur de développement économique n'est pas à démontrer.

Faute de données sur les pays émergents, citons les plus grands groupes industriels producteurs de chaux dans le monde occidental :

Carmeuse, groupe d'origine belge qui possède dans le monde 90 sites de production mettant sur le marché 33 millions de t/an de calcaire et 13 millions de t/an de chaux. C'est le premier producteur américain, avec la société *Carmeuse Lime & Stone*, qui exploite 12 carrières de calcaire et 15 usines de chaux. Le groupe exploite 13 sites en France avec une production de 1,6 million de t.

Le groupe belge Lhoist exploite 89 usines en Europe et est le second producteur américain avec la société *Lhoist North America*. En France, le groupe *Balthazard & Cotte*, filiale de Lhoist, exploite 12 sites et par ailleurs, Lhoist, exploite directement 4 sites dans le Nord et l'Est de la France.

Le groupe Graymont (Canada) est le 3<sup>ème</sup> producteur nord-américain avec 8 usines de production de chaux aux Etats-Unis, 8 au Canada, 17 au Mexique et 1 au Honduras en association avec le groupe *Calindra*.

## 5.2. Production algérienne de carbonates de calcium et de chaux:

- Le carbonate de calcium, calcaire pur, surbroyé ou micronisé, est produit principalement par des entreprises relevant du secteur public (dont 87% avec l'Entreprise Nationale des Granulats –ENG- dont l'unité du Khroub est en tête de file) et par quelques petites entreprises privées (13%) implantées dans l'ouest algérien pour la plupart.

La production totale des ces dernières années fluctue autour de 200000 t [(220000 t en 2009 ; Ministère Energie et Mines (MEM)]. La commercialisation de ce produit est relativement récente. Le marché se met en place progressivement avec l'apparition de nouveaux utilisateurs dans les domaines pharmaceutiques, cosmétique, d'alimentation animale, de peinture, de l'épuration des eaux de lutte contre la pollution. ... Cette filière est appelée à connaître plus de croissance.

- La chaux est fabriquée dans de petites unités artisanales, implantées dans quelques anciennes cités algériennes à des dates plus ou moins reculées. La véritable production (à partir de calcaire et de dolomie) n'a démarrée qu'avec la réalisation du complexe sidérurgique d'El Hadjar (Annaba) au milieu des années 1970. A ce jour, il en est le principal consommateur, l'unité chaux étant implantée à l'intérieur même du dit complexe. Les variétés fabriquées sont des chaux calcitiques et des chaux magnésiennes dont une partie excédentaire est commercialisée comme charge, pour des besoins d'hygiène, d'épuration, d'assainissement ou de construction.

La production de chaux connaît des fluctuations. Elle suit en fait plus le rythme de fabrication des produits sidérurgiques que celui des autres utilisations encore marginales.

En 2009, la consommation en calcaire pour la fabrication de la chaux était de 130000 t à laquelle il faudra ajouter – pour la même année- près de 50000 t de dolomie. Cette consommation a diminué en 2012 (Arcelor-Mittal, Annaba) .

En 2010, l'Algérie a importé 34000 t de chaux éteinte à 47% (Société Chimique de France).

Le calcaire provient de la carrière de Djendel, laquelle est rattachée à la société ARCELOR-MITTAL ANNABA (AMA) qui exploite le complexe d'El Hadjar. Le calcaire de la carrière de Ben Azzouz (toute proche de Djendel) a, par le passé, alimenté partiellement le complexe.

La dolomie est livrée à partir de la carrière de Téioualt (Aïn M'lila-wilaya d'Oum El Bouaghi)

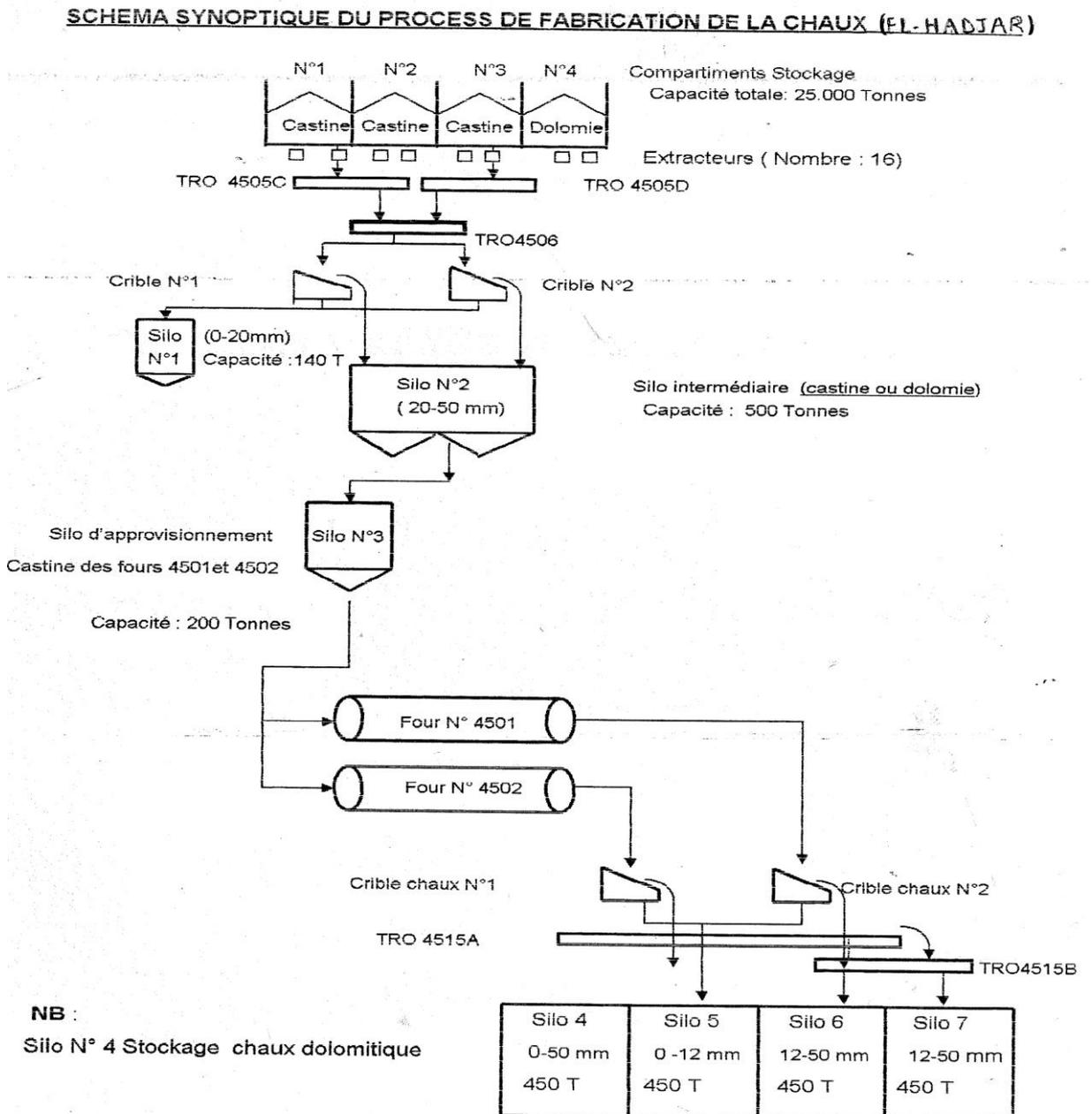
Calcaires et dolomie sont livrés sous forme de castine, c'est-à-dire en produit de dimensions comprises entre 20 mm et 50 mm.

Ces deux matériaux sont contrôlés à leur arrivée au complexe, pour leurs compositions chimiques et leurs granulométries.

Une partie de la castine est introduite dans le haut fourneau, en alternance avec le minerai de fer. Elle sert de fondant à ce dernier et permet de récupérer dans les scories les phases indésirables lors de la transition minerai-fonte.

L'autre partie est destinée à la cuisson- dans des fours rotatifs- pour obtenir de la chaux vive destinée aux aciéries et de la chaux éteinte.

Le processus simplifié de fabrication de chaux dans cette unité est illustré par la figure (5.5) ci-après :



**Fig.5.5-** Flow-sheet simplifié de Fabrication de la chaux à EL Hadjar (SNS, ex AMA).

De la même manière, la dolomie, cuite à température adéquate, également dans des fours rotatifs, produira de la chaux magnésienne.

Dans les aciéries, ces deux types de chaux accompagnent l'épuration de la fonte en acier en retenant les phases indésirables non éliminées au cours de l'élaboration de la fonte. La chaux magnésienne sert aussi à protéger les garnissages réfractaires des fours et convertisseurs d'acier.

Au départ, une connaissance suffisante, tant du point de vue qualitatif que quantitatif, des dolomies et surtout calcaires, à utiliser pour la production de carbonates ou pour la fabrication de la chaux (une ou plusieurs variantes) est primordiale. L'exploration de sites devra être menée avec soin, depuis l'examen du contexte géologique régional jusqu'à la reconnaissance détaillée du (ou des sites) potentiellement favorable. Ces matières premières sont relativement abondantes et affleurantes mais ne répondent que rarement aux critères retenus pour les productions envisagées. Si la nature n'offre pas toujours les conditions recherchées, il est quelquefois nécessaire d'envisager- quand cela est permis- une exploitation sélective, des carrières. La matière moins favorable servira à produire des agrégats.

Ces aspects géologiques et miniers seront abordés dans les chapitres qui suivent.

## 2<sup>nde</sup> PARTIE

## Chapitre 6 : GEOLOGIE REGIONALE

### 6.1. Structuration géologique d'ensemble

Dans le *nord-est* algérien affleurent divers massifs carbonatés répartis souvent dans des terrains à contextes géologiques bien distincts et assez complexes.

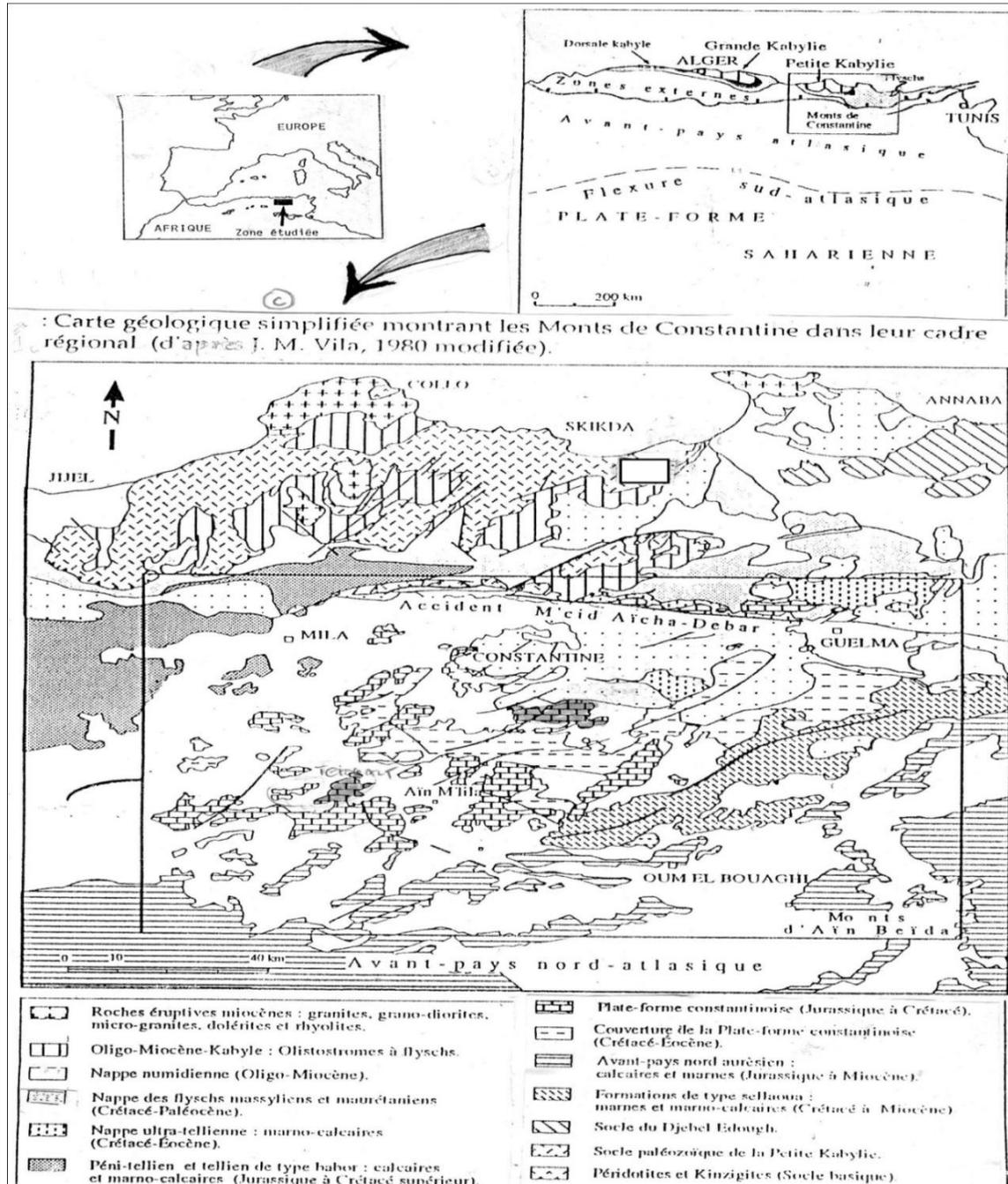


Fig. 6.1-Cartes du contexte géologique de la région de Constantine (d'après Vila, 1980)

Deux secteurs sont considérés ici. Le premier, de faible extension, se trouve au *nord* près de la côte méditerranéenne, dans la région de Skikda; ce sont les massifs du Safia qui font partie du domaine pré-kabyle (Raoult, 1974).

Le second, plus étendu, appartient à la région de Constantine. Dans ce dernier et parmi les formations en présence, il y a au nord, le massif de l'Oum Settas près du Khroub et au sud, le massif de Télioualt plus près de Téléghma que de Aïn M'lila. Ce secteur fait partie de l'ensemble appelé « néritique constantinois » (Vila - 1980) ; il apparaît en détail sur la carte géologique au 1/200000 (Sonatrach – 1977).

Dans l'orogénie alpine, ces deux domaines se rattachent par leur affinité africaine aux zones externes septentrionales de la chaîne des Maghrébides d'Algérie Nord Orientale. Celle-ci n'étant elle-même qu'un tronçon de la chaîne alpine d'Afrique du Nord, schématisé en figure VI. 2). A l'est mais plus au sud, il ya les séries de l'avant pays constantinois et sétifien qui se prolongent par les formations nord aurésiennes jusqu'au pied de l'atlas saharien...

L'édifice orogénique de cette chaîne des Maghrébides résulte de la structuration du bassin maghrébin et de ses marges lors des phases tectoniques tertiaires. Ce bassin se situait entre les marges continentales européenne et africaine (Fig. 6.2). Il était le siège d'un coulisage Afrique - Europe synchrone de l'ouverture de l'Atlantique central et de la Téthys ligure au Jurassique (Aris-1994).

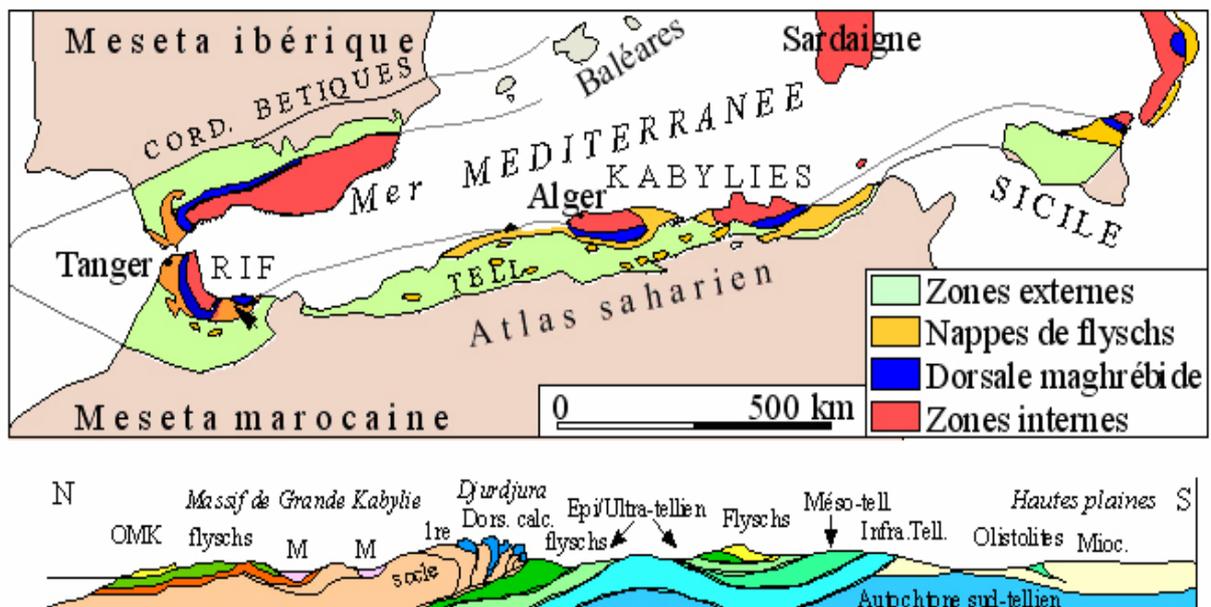
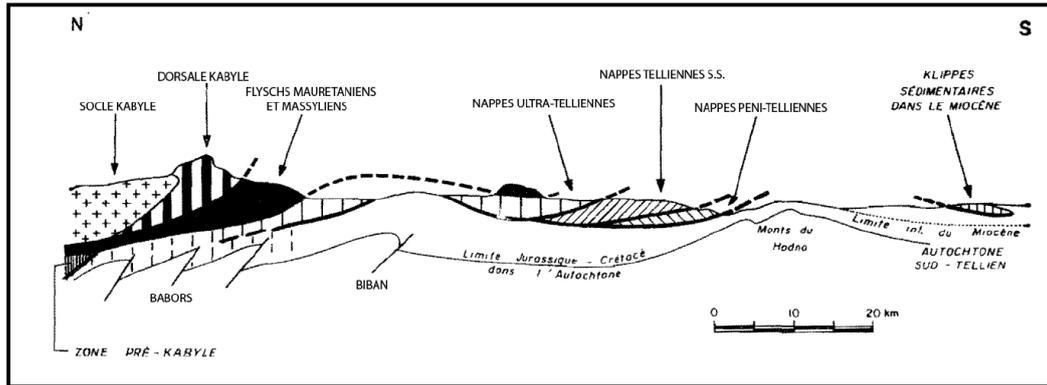


Fig.6.2)- Schéma des ensembles litho-structuraux d'Afrique du Nord et du Sud de l'Europe avec coupe montrant la disposition des zones internes et externes (Durand Delga et Fontboté, 1980)

Dès cette époque, le bassin maghrébin s'est différencié en plusieurs domaines paléogéographiques qui sont actuellement en partie superposés. (Fig.6. 3)



**Figure 6.3)-:** Rapports structuraux entre les différentes unités de la chaîne des Maghrébides (modifiés d'après Durand-Delga, 1969, les Bibans et les Babors qui étaient considérés comme étant de l'Autochtone font également partie des nappes telliennes)

L'ensemble de cet édifice constitue une unité orogénique organisée sur une cassure téthysienne prolongeant les Alpes (Aris - 1994) et comprenant du nord au sud; dans le proche contexte des deux domaines cités plus haut :

- Les zones internes avec des formations cristallophylliennes paléozoïques ou *socle Kabyle* et leur couverture sédimentaire mésozoïque à tertiaire ou *Dorsale Kabyle*, marquée par de nombreuses lacunes lithostratigraphiques.
- La zone médiane avec des formations sédimentaires, pour la plupart d'âge Crétacé, correspondant à des *flyschs* appelés *maurétaniens*, *massylien* et *numidien*. La zone « Prékabyle » en fait partie, et
- Les zones externes comportant diverses séries lithologiques et structurales. Ce sont les *nappes telliennes*, à matériel essentiellement Crétacé et Eocène. La *nappe néritique constantinoise* fait partie de cet ensemble.

## 6.2. Les formations du NE algérien

### 6.2.1. Les zones internes

#### 6.2.1.1. le socle kabyle,

Elément le plus ancien des Maghrébides, est constitué d'un ensemble gneissique et granulitique antécambrien et d'un ensemble de phyllades. Les phyllades constituent une couverture post- métamorphique de l'ensemble gneissique qui comporte une granitisation datée en Kabylie sur **Zr (U-Pb)** entre 270 et 455 millions d'années (MA) et un métamorphisme à 370 MA (Aris - 1994).

### 6.2.1.2. *la couverture sédimentaire*

Elle couvre l'ensemble cristallophyllien qui comprend des formations paléozoïques et une frange étroite de formations sédimentaires secondaires et tertiaires située à la bordure méridionale de l'ensemble et qui constitue *la chaîne* ou *dorsale calcaire*. En Petite Kabylie (entre Jijel et Skikda), la couverture sédimentaire comporte souvent des dépôts détritiques discordants (principalement molasses conglomératiques), d'âge Oligocène supérieur-Miocène inférieur, appelés *Oligo-Miocène Kabyle* (OMK).

Les massifs internes des Maghrébides ont donc constitué une zone haute de la fin du Paléozoïque à l'Oligocène supérieur. Le socle kabyle est bordé au sud par les unités mésozoïques et cénozoïques de la *Dorsale Kabyle* appelée parfois « *chaîne ou dorsale calcaire* » à cause de l'importance du Jurassique inférieur calcaire. Ce domaine est exceptionnellement étroit et ne dépasse jamais quelques km de largeur surtout dans le nord ouest et le nord central algérien. Au nord est, la dorsale apparaît près de Constantine (Dj. Sidi Driss) et on la suit sur 90 km jusqu'au Sud d'Annaba (Dj. Zit Emba). Elle se présente sous forme d'écailles impliquant des formations d'âge Permo-triasique à Eocène moyen (Lutétien).

Du point de vue lithologique, ces formations comprennent des calcaires du Lias et de l'Eocène, des dolomies du Trias au Lias inférieur et des grès du Permo-Trias.

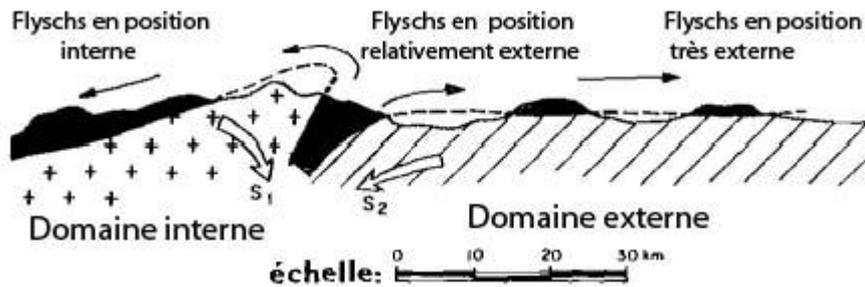
La dorsale kabyle a été subdivisée du Nord au Sud en trois unités qui se différencient par le faciès et l'épaisseur des calcaires : dorsale *interne*, *médiane* et *externe*. En général, les faciès traduisent des conditions de sédimentation de plus en plus profondes lorsque l'on passe des formations de la dorsale interne (dépôts littoraux ou épicontinentaux) à celles de la dorsale médiane (dépôts marneux et plus profonds du Crétacé à l'Eocène) puis aux formations de la dorsale externe qui montrent souvent des radiolarites au Dogger-Malm (*Bouillin, 1986*). Du côté sud, un contact anormal sépare la dorsale kabyle du domaine des flyschs. Les formations du domaine interne chevauchent le domaine des flyschs et le domaine externe tellien.

### 6.2.2. La zone médiane ou domaine des flyschs

Elle est constituée par des nappes de flyschs crétacés-paléogènes qui affleurent dans les zones littorales sur 800 km de long, entre Mostaganem et Bizerte (Tunisie). Il s'agit essentiellement de dépôts de mer profonde mis en place par des courants de turbidités. Ces flyschs se présentent de trois manières :

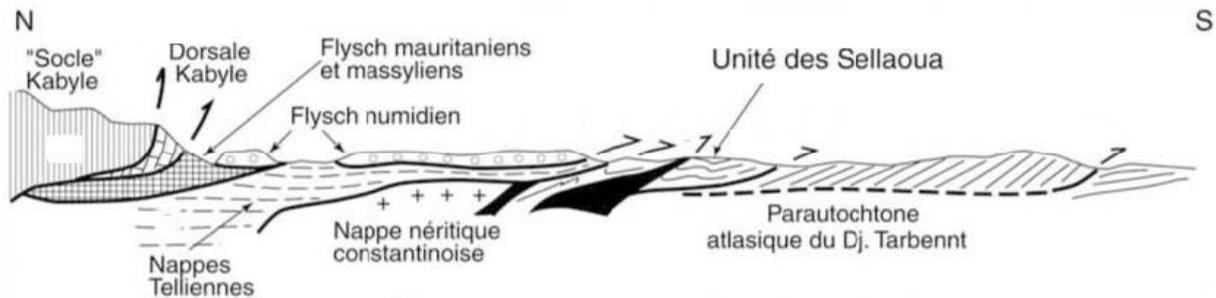
- (i) en position interne, superposés aux massifs kabyles, c'est-à-dire rétrocharriées sur les zones internes, et appelés flyschs nord-kabyles ;
- (ii) en position relativement externe à la bordure sud de la dorsale kabyle (flyschs sud-kabyle) et enfin ;
- (iii) en position très externe, sous forme de masses isolées flottant sur le tell, charriées plusieurs dizaines de kilomètres au sud.

La *figure 6.4* en donne une représentation schématique.



**Fig. 6.4):** Position des nappes de flyschs par rapport aux unités de la chaîne des Maghrébides. (Durand Delga, 1969).

On distingue du Nord au Sud deux grands groupes de flyschs : les flyschs *maurétaniens* et les flyschs *massyliens* auxquels s'ajoutent un troisième groupe de flyschs plus récents : les flyschs *numidiens* d'âge Oligocène supérieur–Burdigalien inférieur. (Fig. 6. 5).



**Fig. 6.5-** Coupe générale synthétique des Maghrébides de l'Est algérien (*région constantinoise*). (Durand Delga, 1969)

#### 6.2.2.1. *Les flyschs maurétaniens*

sont relativement épais et occupent une position interne dans le domaine des flyschs. Ils sont composés d'alternances de bancs argileux, calcaires et gréseux. La série débute par des radiolarites rouges du Dogger-Malm et se termine par des niveaux conglomératiques du Paléocène.

#### 6.2.2.2. *les flyschs massyliens :*

occupent une position externe dans le domaine des flyschs et comportent une série pélito-quartzitique d'âge Crétacé inférieur surmontée par une série pélito-micro-bréchiqque d'âge Crétacé supérieur.

#### 6.2.2.3. *les flyschs numidiens :*

constitués de niveaux gréseux d'âge Oligocène terminal –Aquitaniens épais de plusieurs centaines de mètres qui reposent sur des argilites versicolores oligocènes. Ces flyschs se trouvent anormalement à la fois sur les zones internes et sur les zones externes.

### 6.2.3. La zone « prékabyle » :

De faible extension, cette zone particulière, apparaît dans un secteur bordé au *sud* par le sillon tellien et au *nord* par les flyschs kabyles (Raoult, 1974). Elle a une configuration complexe où se superposent plusieurs nappes, d'importance et de styles variés, laissant apparaître en fenêtre les séries du **Safia** et du Filfila. *Ici, elle est individualisée. Mais elle peut aussi être rattachée aux zones externes.*

### 6.2.4. Les zones externes ou domaine tellien

Ce dernier est formé par un ensemble de nappes allochtones pelliculaires constituées principalement de marnes d'âge Crétacé moyen à Néogène. Elles ont été charriées sur des dizaines de km vers le Sud. On distingue du Nord au Sud :

#### 6.2.4.1. *les nappes ultra-tellienne)*

Elles comportant des formations bathyales au Crétacé et à l'Eocène puis une série plus détritique au Sénonien et à l'Eocène. Ces nappes ne sont connues que dans l'Est algérien et en Tunisie. Elles présentent des caractères proches de ceux du flysch massylien. Elles apparaissent dans une structure renversée et charriée. Le contenu lithostratigraphique est marqué, au Crétacé, par la présence d'abondants bancs de calcaires fins, micritiques et, à l'Eocène, par des marnes sombres et des calcaires noirs (Durand-Delga, 1969).

#### 6.2.4.2. *Les nappes telliennes sensu-stricto,*

Elles affleurent sur de grandes étendues dans la région de Sétif, contenant des séries à matériel essentiellement vaseux de teinte sombre, allant du Crétacé à l'Eocène supérieur. Plusieurs nappes y ont été identifiées :

Il s'agit de la nappe de Djemila (Vila, 1980), des séries bibaniques (Vila et Leikine, 1976) et de type Béni Abdallah (Glaçon, 1967 et Leikine, 1971), des séries de type Drâa et Arba-Erraguène (Leikine, 1971), des séries de type Gouraya-Arbalou-Brek (Leikine, 1971 et Obert, 1974) et des séries de type Barbacha (Leikine, 1971), [in Farah, 1991].

#### 6.2.4.3. *La nappe péni-tellienne et les unités méridionales à nummulites,*

Les unités de la nappe péni-telliennes apparaissent en lambeaux charriés sur les massifs néritiques aux djebels Grouz, Kheneg et Chettaba et en fenêtres sous les marnes noires des nappes telliennes au djebel Akhral (ou Akhal ; lire Ak-hal). Elles sont formées par une séquence de carbonates et de vases, allant du Lias au Paléocène.

Pour les unités les plus méridionales une zone stratigraphique- attribuée au Sénonien-apparaît sous forme de lambeaux. Elle est associée à des formations éocènes riches en nummulites qui sont disposées irrégulièrement au front des nappes telliennes (Vila, 1980).

Dans le domaine externe existe des unités encore plus externes et d'allochtonie notable, plus ou moins étendues, structurées au Miocène moyen qu'on appelle *séries de l'avant-pays allochtone* ou *tellien* et se placent entre les nappes telliennes au Nord et l'autochtone ou para-autochtone atlasique au Sud.

#### 6.2.4.4. *La nappe néritique constantinoise*

Les formations néritiques constantinoises se composent de massifs isolés et de tailles variables. Ils sont étalés sur une assez grande superficie (tout le centre de la carte au 1/200000 de la région de Constantine). Les principaux affleurements sont, au *nord* : les djebels Debar, Grar, Kheneg... ; au *centre* : l'**Oum Settas**, le rocher de Constantine, le Chettaba, les djebels Zouaoui, Friktia, Felten, Grouz... et au *sud* : les monts de Aïn M'lila avec les djebels Fortas, Guérioun, Ouled Sellam, **Téioualt**, Timetlass...(Fig.6.6)

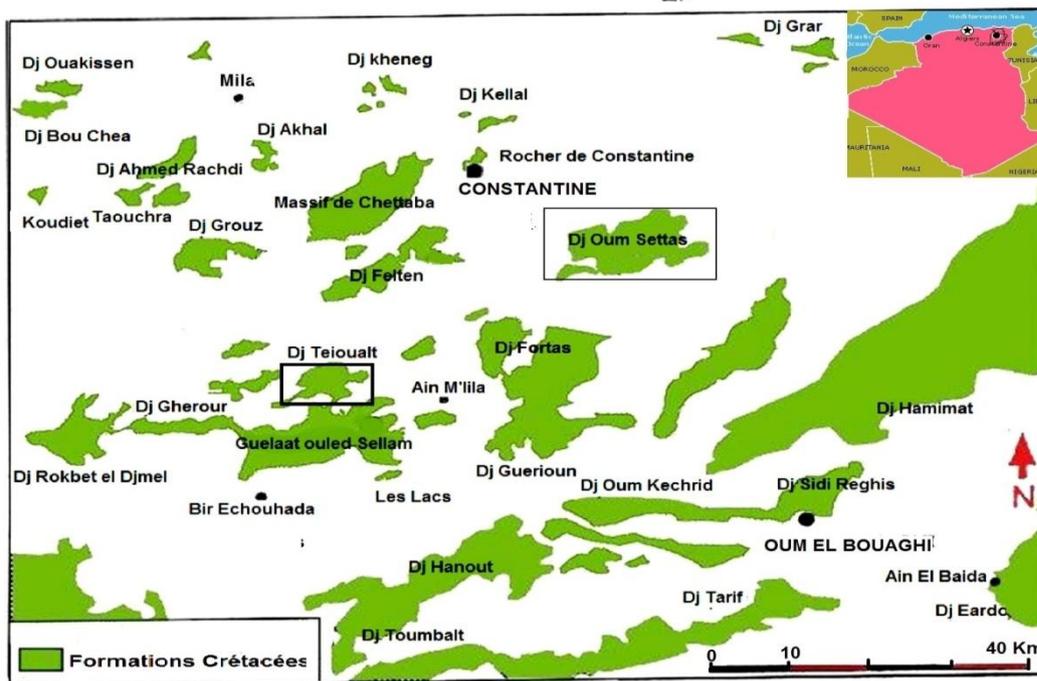


Fig.6.6 - Répartition régionale des massifs néritiques constantinois, (Vila, 1978)

Il s'agit de massifs carbonatés, plus ou moins karstiques, mis en place entre le Jurassique et un Sénonien transgressif. Ces massifs ont une histoire tectonique assez controversée (Vila, 1980). Ils correspondent à l'un des témoins d'une plateforme à sédimentation de haut fond. Plateforme dénommée successivement « môle », « autochtone » puis « nappe » néritique constantinoise. Ces terrains affleurent sous forme de horsts à partir d'un ensemble de formations marno-calcaires d'âge fini Crétacé à Eocène.

De nombreux indices caractérisent l'allochtonie de cette plateforme et de sa couverture [(Vila, 1980) ; (Coiffait et Lahondère, 1992)].

#### 6.2.4.5. *Les séries de l'avant pays sétifien (Farah, 1991)*

Elles constituent un vaste ensemble d'unités allochtones décrites par Vila (1980), il s'agit :

- Des unités allochtones sud-sétifiennes composées de matériaux carbonatés.
- De l'unité de Djaffa formée par une alternance de faciès marneux typique de la *zone des Sellaoua*.

- Des faciès carbonatés de plateforme.
- Des unités à dominante marneuse, ou marno-calcaire des Sellaoua, qui séparent le domaine néritique constantinois au nord du domaine hodnéen au sud.
- De l'unité du djebel Hamimat à dominante marneuse.

#### **6.2.4.6. *Le parautochtone nord-aurésien (Farah, 1991)***

Il se situe à la limite septentrionale de l'autochtone atlasique. Il correspond à l'ensemble des structures formées par les monts d'Aïn-Yagout et par les djebels Hanout, Oum Kebrid, Guellif, Sidi Reghis ...

Cet ensemble a été fortement affecté par la tectonique alpine. Le Trias de la région des lacs peut être interprété comme le cœur d'un vaste pli couché.

#### **6.2.4.7. *l'autochtone nord-aurésien (Farah, 1991)***

Il fait partie du domaine atlasique caractérisé par un ensemble secondaire, modérément plissé à la fin de l'Eocène selon des directions atlasiques et par un Trias diapirique d'âge Aptien, qui se manifeste plus à l'est, dans les monts de Tébessa et la région de l'Ouenza.

Dans ce qui suivra nous considérons séparément les contenus et les dispositions relatives des formations dans la zone prékabyle et dans le domaine néritique constantinois.

## Chapitre VII : GEOLOGIE DES SECTEURS ETUDIES

### 7.1. Le domaine Prékabyle (Deleau, 1937, Raoult, 1974 ; Vila, 1980)

Ce domaine où se trouve la série du Safia occupe une superficie de quelques centaines de km<sup>2</sup>. Il est situé à une douzaine de km à vol d'oiseau à l'ESE de Skikda et à une cinquantaine de km à l'ouest d'Annaba. Il s'agit d'une série de monticules plus ou moins parallèles; mamelonnés, moyennement élevés, et orientés grossièrement NO-SE. Ces massifs correspondent à des structures anticlinales prolongeant, vers le S-E à partir du littoral, la série apparentée du Filfila (Fig.7.1). Ces structures où s'empilent diverses nappes, résultent de plusieurs phases tectoniques d'importance et de styles variés (Raoult, 1974)

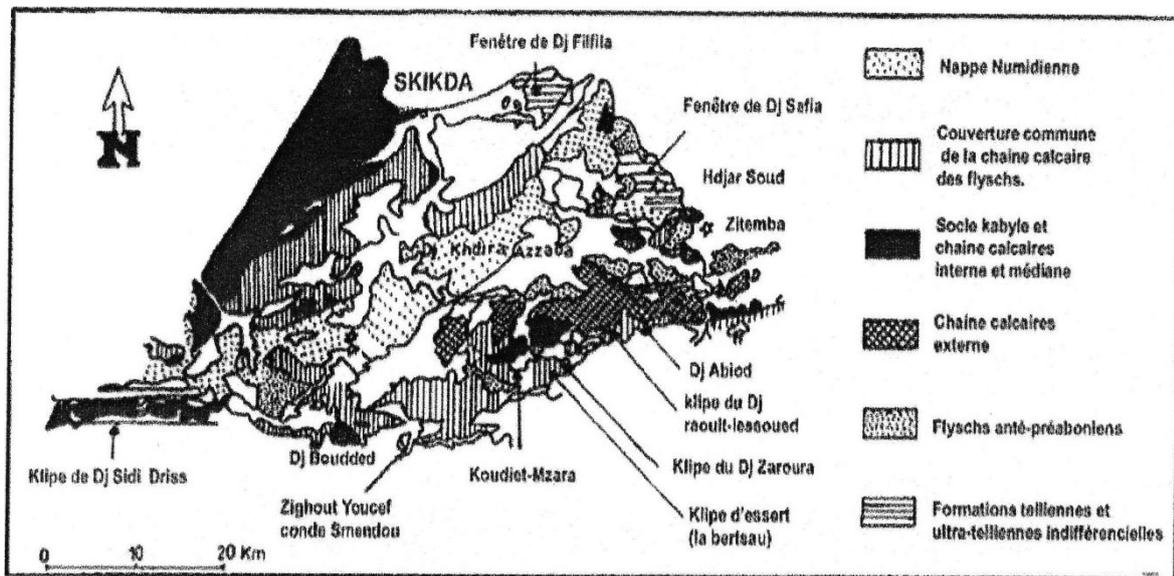
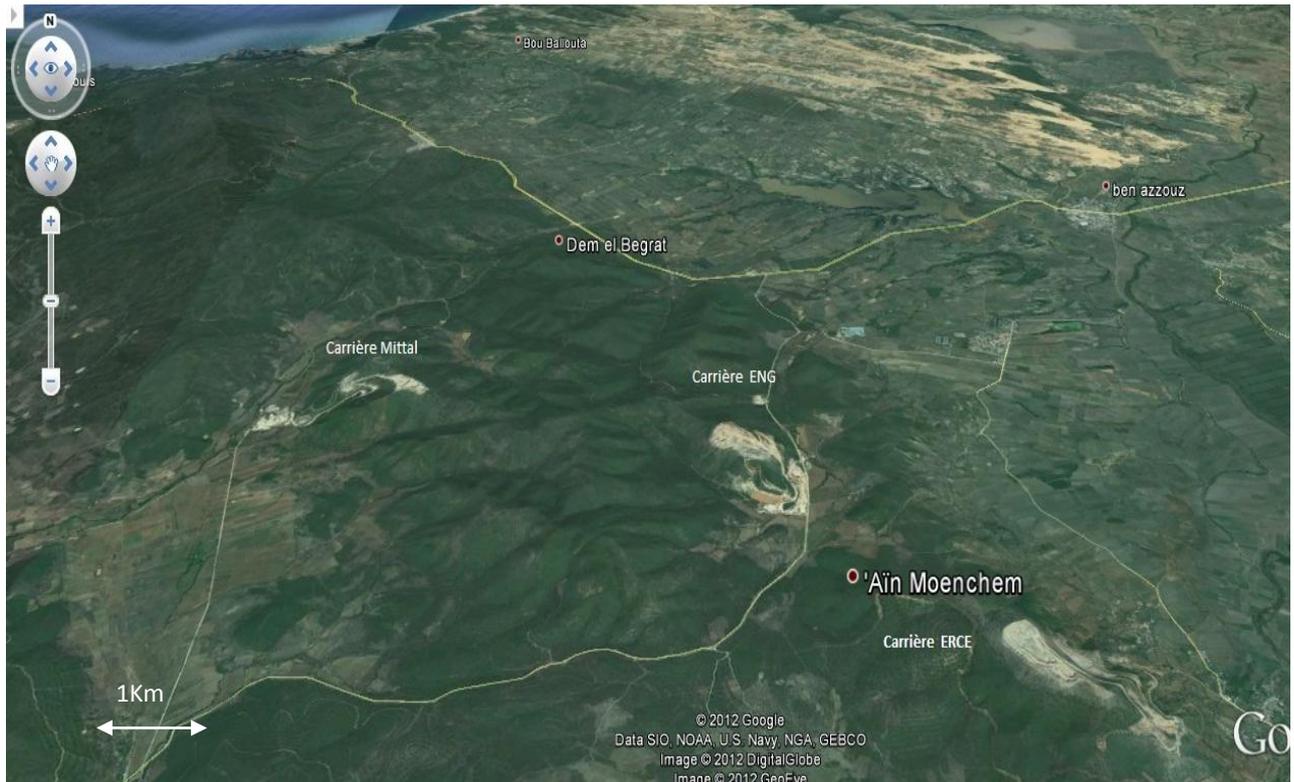


Fig. 7. 1-Principaux éléments structuraux de la chaîne calcaire et des flyschs dans le centre de la chaîne numidique [d'après Vila, 1980].

- C'est dans les carbonates du Jurassique que quelques carrières moyennes ont été ouvertes, parmi lesquelles celle de Djendel (Arcelor Mittal), celle de Ben Azzouz (ENG) que nous étudions ici et la carrière alimentant la cimenterie de Hadjar-Soud (Ex ERCE). La photo (Fig. 7.2) indique leurs positions.



**Fig.7.2** - Photo Google montrant les carrières étudiées de la série du Safia, (Google, 2012).

Deleau, (1937), auteur de la carte géologique de Azzaba (ex Jemappes, feuille numéro 32, 1/50000,) a été parmi les premiers à faire connaître cette unité, fortement boisée, prolongeant le massif du Filfila et qui n'a pas livré tous ses secrets aux auteurs qui lui ont succédé.

### 7.1.1. Lithostratigraphie (Fig. 7 3)

#### 7.1.1.1. *Au paléozoïque*

La série du djebel Safia débute par un complexe métamorphique schisteux (socle kabyle) à niveaux quartzitiques et grés-micacés, parfois fracturés, remontant au paléozoïque ; elle est surmontée :

#### 7.1.1.2. *Au jurassique*

Suit une série de calcaires massifs attribuée au Lias (50m à 300m) et comprenant *de haut en bas* :

##### a)- Au Lias inférieur :

- ✓ des calcaires compacts gris blancs, oolitiques, cristallins, zoogènes (gastéropodes, calcaires à entroques...),
- ✓ des calcaires gris bleutés, cristallins,
- ✓ des calcaires dolomitiques,
- ✓ des dolomies grises, des brèches dolomitiques (à Oued E-Zir).

L'ensemble forme ces reliefs calcaires dans le djebel Safia et les massifs avoisinants : Chbibek, Abiod, et des îlots sur les schistes anciens du djebel Raout Lessoued.

**b)- Au Lias supérieur** (et jusqu'au Dogger inférieur) :

Il apparaît un ensemble marno calcaire, sublithographique, bien stratifié où s'intercalent des silex. Des fossiles caractérisant cet ensemble se rencontrent à la coudiat Mzara (Domérien Supérieur à Ildocéras). Cette formation apparaît sous forme de petits lambeaux aux djebels Chbibek, Abiod, Raout Lessoued et Mzara.

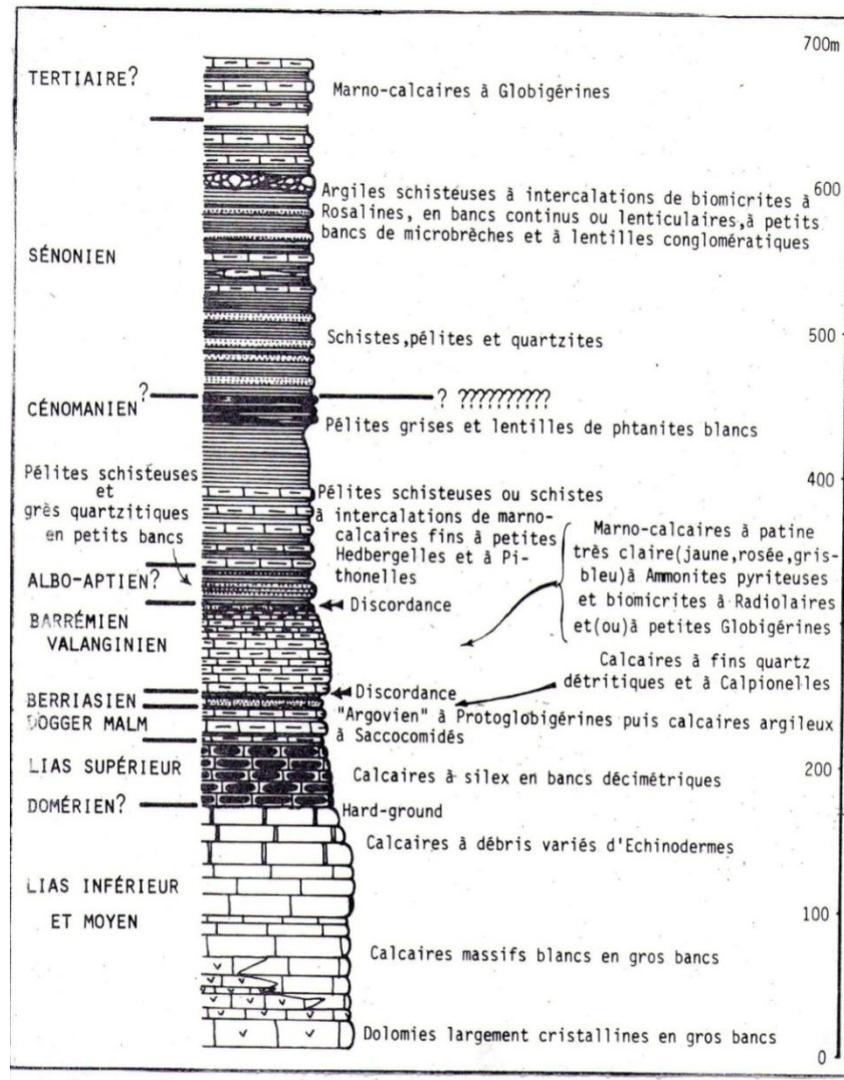
### **7.1.1.3. Au Crétacé**

**a)- Le Crétacé Inférieur** (80m à 100m) :

Il montre un ensemble marno calcaire à nodules de silex qui comprend de haut en bas :

- ✓ des marno calcaires où s'intercalent des lits schisteux (10 cm à 15cm) et où cinquante mètres plus bas - l'on retrouve des niveaux fossilifères datant le Valanginien, qui reposent en concordance sur :
- ✓ des calcaires (50m) bien silteux, lesquels s'appuient sur le Lias par une discordance souvent masquée par des accidents tectoniques à la base du Valanginien,
- ✓ un ensemble marno calcaire et des schistes du Barrémien, se rencontrent sur les flancs sud du djebel Safia et de la forêt de même nom. Ces formations – d'épaisseurs variables- sont alternées mais les niveaux schisteux diminuent d'épaisseur (métrique à cm) en descendant dans la série.

Une reconstitution lithostratigraphique est donnée en figure 7.3.



**Fig.7.3-** Log. Stratigraphique d'un secteur méridional du Djebel Safia (Vila, 1980).

**b)- Le Crétacé Supérieur :**

Il contient des schistes et marno calcaires, attribués à l'Albo- Aptien (Deleau, 1937) et qui auraient une épaisseur de 150m à 200m. Les schistes- épais de 4m à 5m, sont bleus ou rouges, micacés, à filonnets de quartz. Dans la carrière de Ben Azzouz, ces schistes affleurent sur quelques mètres seulement. Ils montrent des filonnets de calcite en forme de boudins, biseautés cm et pluri cm (Photos 7a et 7b, Chapitre 8.). Les marno calcaires ont des teintes bleues ou roses, avec des épaisseurs de 25 cm à 30 cm au djebel Safia.

Par la suite, ces flyschs ont été reconnu d'âge Sénonien (Vila et Sigal, 1969)

**7.1.1.4. Au Tertiaire**

L'assise des formations précédentes est constituée de poudingues rouges à éléments du socle ancien (calcaire, grès calcaire...) ; elle est épaisse de 100m à 110m et peut atteindre le Paléocène. Elle surmonte :

a)- L'Eocène inférieur, qui apparaît avec :

- Des calcaires massifs, blancs, oolitiques, zoogènes datés du Lutétien, rencontrés dans les revers *nord* et *N-O* du djebel Chbibek et à la cote 149 de l'oued Zeer.
- Un complexe calcaro-marno-schisteux apparaît au Lutétien Supérieur sur *150m à 250m*. Il comporte des schistes blancs, jaunâtres ou grisâtres à lie de vin avec des intercalations de calcaires, psammites, conglomérats, grès, calcaires et brèches calcaires. Ce complexe est visible généralement dans les vallées (oued Ouldja, Mesken, Zeer, Zani) et passe latéralement aux assises calcaires plus massives, grossièrement détritiques des chaînons.
- Le sommet du Lutétien contient des poudingues et grès calcaires grossiers souvent glauconieux à éléments de calcaire compacts (Lias, Lutétien.)

b)- L'Eocène Supérieur, montre :

- Des grès calcaires qui présentent, en fait, un passage latéral des faciès qu'ils surmontent.
- Des brèches calcaires à éléments anguleux de calcaire jaune, gris, cristallin (Lias à Lutétien supérieur) ; elles peuvent alterner avec des couches de marne bleues, de grès calcaire...
- Des poudingues gris bleu à débris de schistes lustrés, quartz, calcaire. Puis un complexe marno schisteux.
- Des poudingues de base du *numidien*, à galets de quartz, quartzite, schistes satinés, gneiss unis par un ciment ferrugineux.

Des niveaux argileux, argilo schisteux, gréseux, pelitiques surmontent l'ensemble sur des épaisseurs dépassant parfois les *300 m*.

Au *nord-est* de Ben Azzouz (1 km environ, à vol d'oiseau) un monticule a connu un début d'exploitation dans une formation gréseuse de la couverture numidienne.

### 7.1.2. Tectonique et paléogéographie :

- Il y a dans les séries géologiques de cette région de vastes lacunes. Le Pliocène et à un degré moindre le Miocène, ailleurs si répandus en Algérie, ne sont guère connus ici. Le Jurassique et le Trias semblent totalement manquer. Le Primaire est très probablement absent en grande partie bien qu'il puisse constituer le gros des terrains métamorphiques, totalement dépourvus de fossiles.

Tous ces hiatus stratigraphiques, ces discordances, ces conglomérats témoignent d'un passé fort agité, accentué par d'énergiques déformations auxquelles on associe plis et anticlinaux alignés NO-SE du djebel Si Messaoud (Ben Azzouz), ou de Djendel (*Raoult-1974*). Ce sont autant de rides du substratum dont deux des plus importantes le djebel Safia et la coudiat Sidi Fritis sont fracturés longitudinalement affectant la période Eocène-Priabonien. D'autres directions de failles ou faisceaux de failles orientées N40° E ou encore N-S sont présentes. Des déboîtements type horst - graben dans diverses directions touchent également ce secteur bouleversé par des épisodes de chevauchement (Crétacé-Tertiaire).

L'aire synclinale d'Azzaba sépare cette région de plis NO-SE de la chaîne numidique orientée OSO-ENE.

Le djebel SAFIA occupe une position structurale complexe, analogue à celle du Filfila situé plus au NO. Il apparaît- comme ce dernier- en « fenêtre » sous le socle Kabyle qui le

chevauche (Fig.7. 4). Sa partie orientale est recouverte par du quaternaire, alors qu'au NO, à l'ouest et au sud, il s'enfonce sous les phyllades paléozoïques du massif de petite Kabylie.

Il est par ailleurs affecté par un épi métamorphisme à effet décroissant en partant du Filfila, donnant une roche carbonatée marmorisée, cristalline, dont la cassure au marteau présente souvent un débit prismatique.

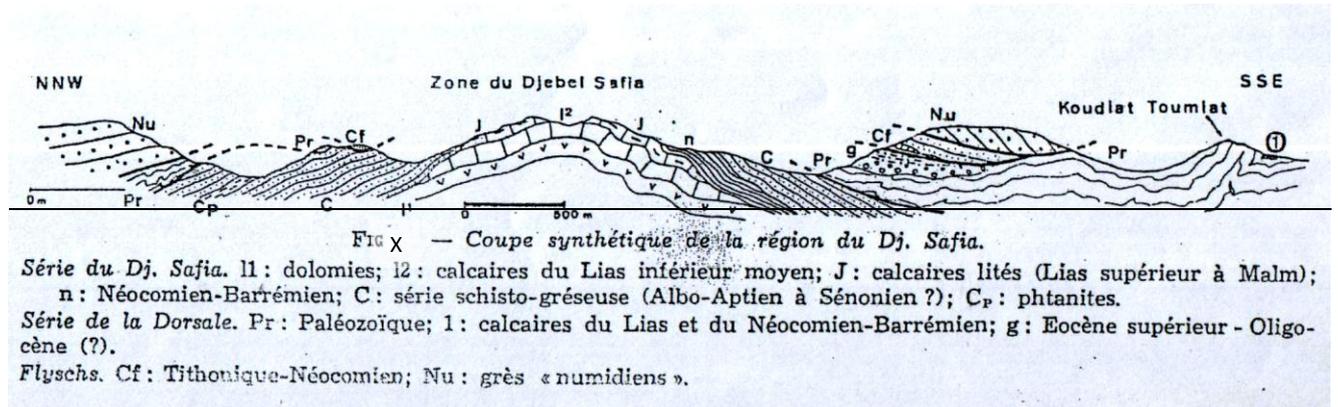


Fig.7. 4 - Coupe synthétique montrant la série du Safia (Raoult, 1974)

- La partie orientale du djebel Safia, recouverte par du quaternaire (plaine de Senhadja), apparaît comme un fossé tectonique entre le massif de l'Edough et celui de Filfila.

Au Pliocène la mer est venue l'envahir, le jeu en subsidence s'est prolongé jusqu'après le Pliocène qui est déformé.

Lacunes de dépôts, érosions, déformations diverses ont rendu complexe la géologie de cette partie de l'Algérie.

De nombreux auteurs s'accordent à dire que la région du Filfila - Safia (voire Moul-Demamène, situé plus à l'ouest) appartient à la zone « prékabyle » qui correspond à une entité structurale difficile à cerner car ses contours et ses articulations avec les secteurs avoisinants sont imprécis. Si elles ne gardent pas cette dénomination, les séries apparentées à cette zone sont rattachées soit au *domaine tellien*, soit à celui des *flyschs*.

## 7.2. Le domaine néritique constantinois

### - Au centre

Près de Constantine, dans la région de Bou Nouara se trouve le massif de l'Oum Settas. Il est situé à quelques 6 km à l'est du Khroub. Son altitude dépasse les 1000m, il est allongé grossièrement E-O. Son flanc *sud* est facile à repérer, à cause des empruntes laissées par les carrières exploitant les calcaires du Crétacé. Celle de l'ENG, située au S-E, étant la plus importante.

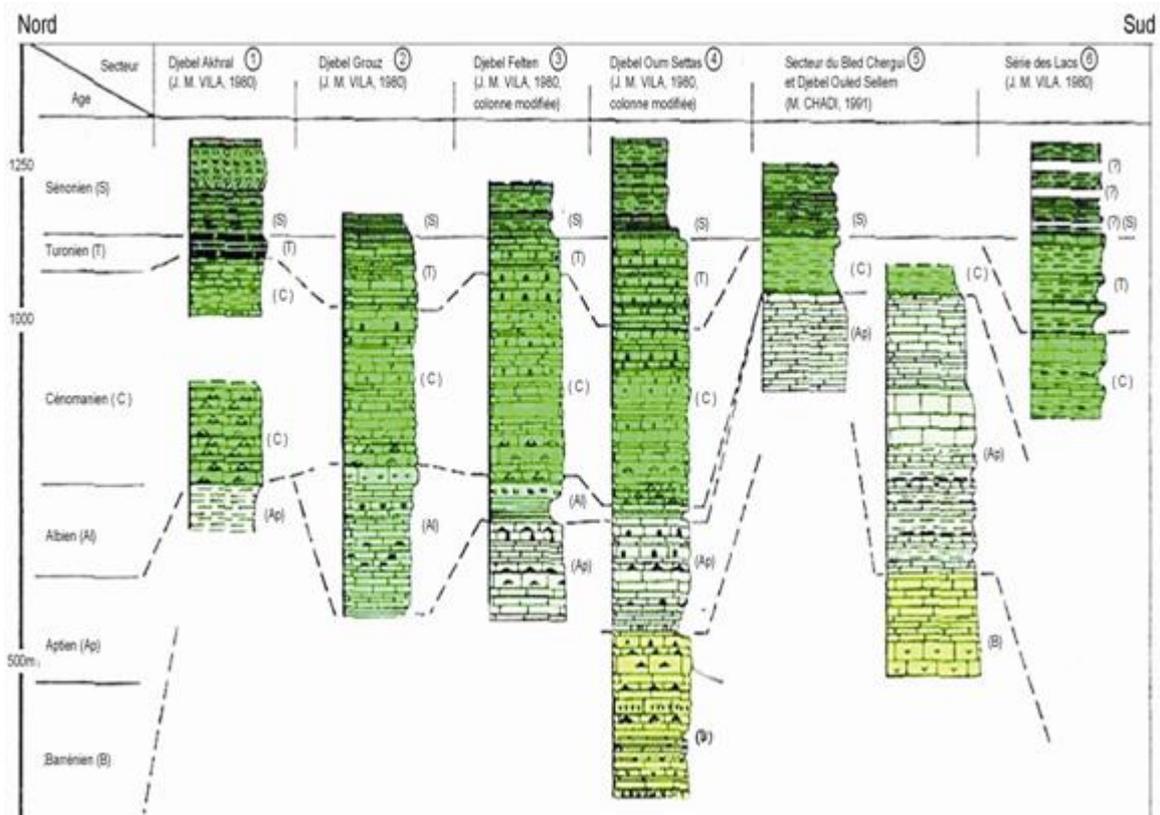
Ce massif surgit en horst comme la plupart des autres massifs de la nappe néritique constantinoise.

- *Au sud*

A une quarantaine de km au SSO de Constantine et à quelques km à l'est de Téleghma,affleure le massif de Téioualt. Il est rattaché aux formations néritiques constantinoises méridionales. Ce massif, allongé E-O, a des altitudes dépassant les 1000 m. Les gradins de la carrière exploitant les formations dolomitiques du Néocomien sont visibles à partir de la route joignant Aïn M'lila, vers l'est juste à la sortie de Téleghma.

**7.2.1. Lithostratigraphie**

Elle reflète les formations rencontrées dans les parties centrales et méridionales précédentes. La **figure 7. 5** représente la lithostratigraphie de quelques massifs apparaissant en figure 6. 1 et 6.2. du chapitre 6.



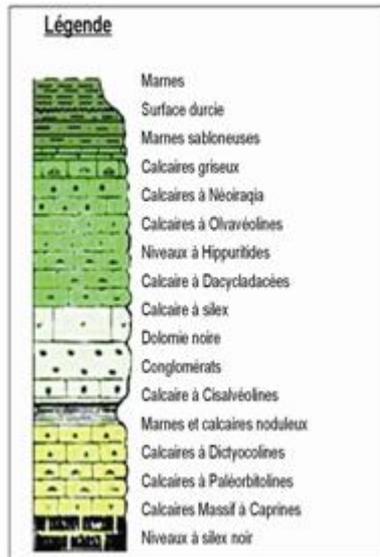


Fig.7.5 - Corrélation stratigraphique dans quelques massifs du néritique constantinois

### 7.2.1.1. *Le Trias et le Jurassique*

Les terrains les plus anciens du constantinois appartiennent au Trias qui est essentiellement évaporitique. Ces terrains apparaissent en pointements diapiriques et en lames éjectées le long des accidents. Parmi ces affleurements sont connus du Nord au Sud :

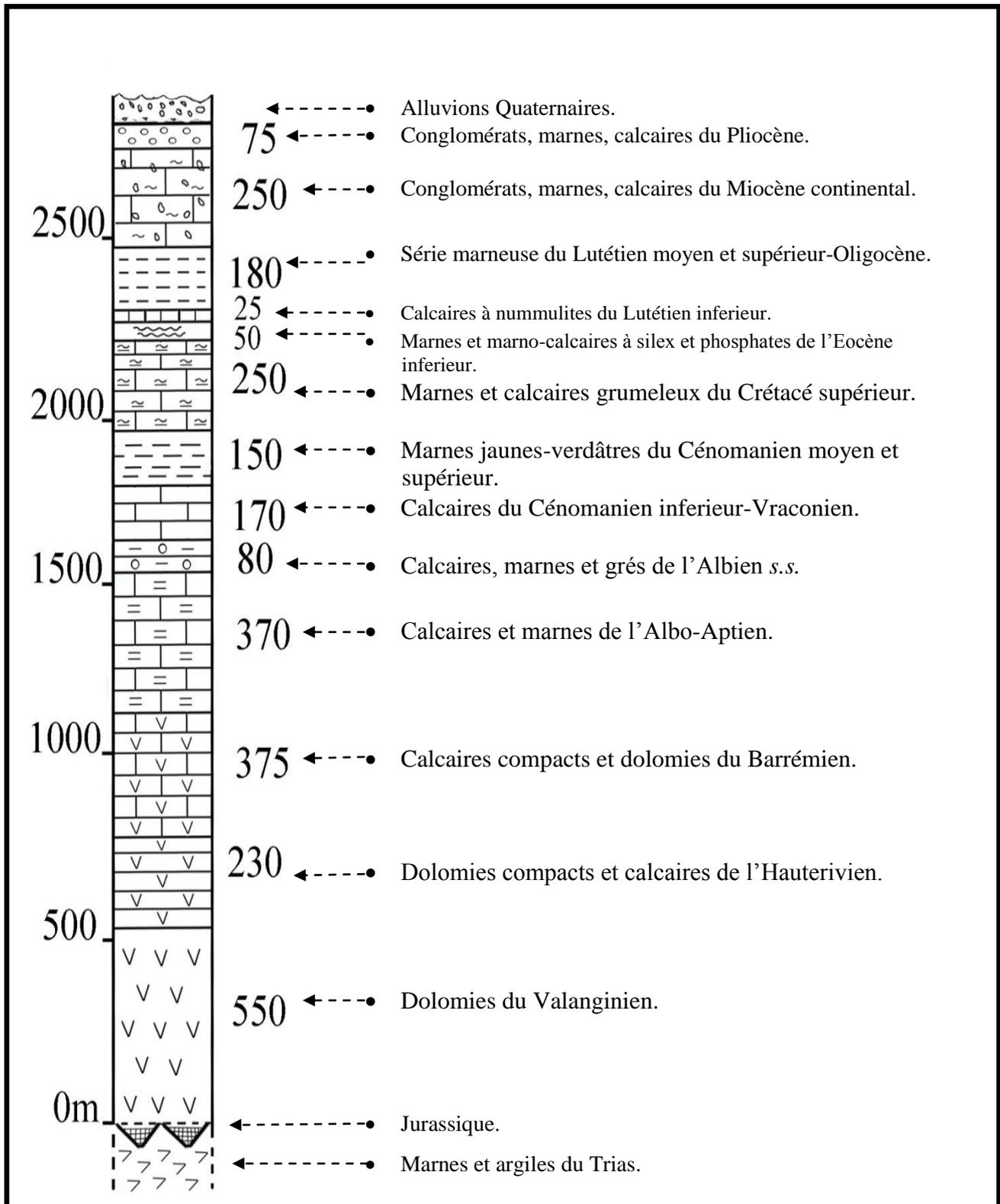
- les affleurements de Sidi-Mérouane et ceux de Kheneg et Aakrab (dit aussi Akral ou Akhal), au N-O et à l'ouest de Constantine,
- les affleurements de la dépression du Chettaba- Djebel Ech-Chebka - Aïn el Kebch, à l'ouest et au S-O de Constantine,
- Les affleurements liés aux formations tertiaires situées au Sud des massifs du Felten et de l'Oum-Settas (près d'Ouled Rahmoun),
- le Trias de la région des Lacs et celui d'Aïn-Kercha.

Ces formations montrent des masses de gypse et d'argiles, de couleur rouge lie-de-vin très caractéristique, qui contiennent souvent des blocs calcaro-dolomitique, des cargneules, des marnes bariolées verdâtres et des blocs de roches volcaniques (diabases ou ophites selon les auteurs) également visibles près d'Ouled Rahmoun. A ces évaporites sont associées des minéraux libres sous forme de cristaux bipyramidés (quartz) ou rhomboédriques (dolomites). Les affleurements triasiques sont quelquefois contrôlés par des failles ou encore associées à des roches gréso-calcaires et dolomitiques.

Le Jurassique affleure au *nord* et au *sud* d'une bande E-O constituée par les massifs de l'Oum-Settas, Felten et Grouz. Il apparaît au nord de Constantine (bordure du Kheneg et du djebel Aakrab) et dans *la région d'Aïn M'lila*. Il s'agit en général de dolomies et de calcaires à silex dont la puissance peut dépasser les 600 m. Ces formations sont localement associées à des calcaires massifs oolitiques et parfois à des marnes.

Le massif du Chettaba contient une épaisse série de calcaires massifs (environ 100 m) dans lesquels se reconnaissent des niveaux de calcaires fins à fossiles du Jurassique supérieur.

Dans les *massifs qui entourent* la ville et la plaine *d'Aïn M'lila*, le Jurassique correspond à une puissante série de dolomies sombres surmontée localement par des marno-calcaires du Jurassique supérieur (Fig.7. 6).



**Fig.-7. 6-** Log lithostratigraphique de la région d'Aïn M'lila à proximité du massif de Téioualt (Reconstitution d'après Bär, 1957).

A une dizaine de Km au Nord Ouest d' Aïn M'lila, *Vila et Lahondère*, (1991) signalent dans le graben du djebel Timetlass, l'existence d'une série jurassique représentée, de la base au sommet, par des calcaires massifs à intercalations de bio micrites, des marnes vertes et rouges et des calcaires à débris de coquilles. Cet ensemble est daté du Lias.

### 7.2.1.2. *Le Crétacé*

Il y a lieu de distinguer ici, les séries crétacées liées aux massifs néritiques constantinois et à leur couverture, des formations crétacées qui sont situées en dehors du champ de ces séries (*Aris, 1994*)

- *Les terrains autochtones* affleurant dans la région de Constantine forment une série qui débute au Néocomien par des faciès néritiques de plateforme carbonatée puis passent à des ensembles marno calcaires dès le Turonien ou même localement dès l'Albien. Ces marno calcaires constituent la couverture de la série calcaire Jurassico-crétacée de la plateforme constantinoise.
- *En dehors de ce champ*, les séries sont moins calcaires, à faciès plus profond. Elles caractérisent des bassins ayant le plus souvent un fonctionnement plus complexe. C'est le cas, à l'est et au SE de Constantine, pour le bassin des Sellaoua qui, en fait, est le prolongement occidental du sillon tunisien (*Aris-1994*).

***Seuls les terrains en rapport avec le néritique constantinois seront examinés dans le cadre de cette étude.***

\_ Les affleurements les plus anciens, connus dans la région, surmontent des dolomies jurassiques à l'ouest du djebel Frikitia (S-O de Constantine). Ils correspondent à des lits marno calcaires à ammonites pyriteuses d'âge Valanginien. Au-delà du Valanginien, les faciès deviennent essentiellement calcaires jusqu'à l'Aptien et même jusqu'au Turonien.

Dans le rocher de Constantine, au Nord et au N-E du massif de *l'Oum-Settas* et dans les massifs de Guelma, la sédimentation de type plateforme persiste jusqu'au Sénonien supérieur suite à un arrêt de sédimentation généralisé au cours du Sénonien inférieur. Les calcaires sont des biomicrites maestrichtiennes représentées par une série condensée discordante parfois directement sur les calcaires d'âge Cénomaniens.

Dans les *massifs d'Ain M'lila* les faciès de plateforme ne vont pas au-delà de l'Aptien supérieur. Les formations post aptiennes sont à faciès marno-calcaires et constituent la couverture dite marno - calcaire de la plateforme constantinoise. (*Aris-1994*).

#### **a)- Le Néocomien**

Le Néocomien affleure dans les djebels Akral, Kheneg, Chettaba et dans les massifs du Fortas et du Guérioun. Il s'agit d'une épaisse série de marnes, de calcaires argileux (djebel Akral) et de marno-calcaires contenant des niveaux de marnes jaunes à *Ammonites* pyriteuses. La série néocomienne se termine par des calcaires à silex d'âge Hauterivien-

Barrémien (probable) visible à l'ouest du djebel Friktia et à une dizaine de Km plus au nord, dans le massif du Kheneg.

#### **b)- Le Barrémien**

Au niveau des djebels Kheneg, Chettaba, Felten et *Oum-Settas*, entourant Constantine, le Barrémien est représenté par une épaisse série de calcaires massifs clairs dans lesquels s'intercalent de rares passées de marnes grises. Les calcaires contiennent une riche microfaune (*Textularidès*, *Orbitolinopsis*...). Le passage Barrémien - Aptien est connu grâce au repère à *Paloobitolina lenticularis* et *Dyctioconus arabicus*. Dans les *monts d'Ain M'lila*, le Barrémien inférieur est comparable à celui décrit aux alentours de Constantine. Le Barrémien supérieur est représenté dans les massifs de Guelât Ouled Sellam et de Hanouda par une épaisse série de calcaires à algues et de marnes gréseuses.

#### **c) - l'Aptien**

Dans l'ensemble des massifs du néritique constantinois, l'Aptien est généralement représenté par des calcaires relativement homogènes comprenant une série épaisse de calcaires gris clair en bancs réguliers à Miliolidés. L'Aptien inférieur est repéré par des niveaux à *Salpingoporella dinarica* et l'Aptien supérieur par une séquence lithologique à *Ovalvéolina Reicheli* [Bär et Magné, 1955 (in Aris-1994)].

Le sommet de cette série est marqué par une surface d'érosion régionale (dite aussi surface durcie ou « hardground »). Localement, au djebel Mazela (près du Khroub), l'Aptien montre des passées décimétriques de marnes jaune clair parfois à grains centimétriques de pyrite.

#### **d) – L'Albien et le Vraconien**

L'Albien ou l'Albien-Vraconien décrit par Raven, 1957 (in Aris -1994) dans le massif de *l'Oum Settas*, est constitué de marnes et de marno-calcaires glauconieux, légèrement phosphatés et fossilifères au sommet, qui se terminent par un mince niveau conglomératique à gangue marneuse. Les calcaires glauconieux livrent d'abondantes *Mélobésiées* et *Favusella Waschitensis* de l'Albien. Dans le Djebel Friktia (S-W du Chettaba), l'Albien est représenté par une série épaisse de 40 à 50m constituée de marnes et de calcaires noduleux à ammonites [Fourcade et Raoult, 1971 (in Aris, 1994)].

Au dessus d'une surface durcie qui termine l'Aptien, l'Albien débute par quelques décimètres de marnes noduleuses suivies de 4 à 5 m de marnes jaunâtres à serpules, échinodermes, lamellibranches (*Exogyra Latissima*), bélemnites et à ammonites (indéterminables) au dessus desquelles vient une barre calcaire épaisse d'environ 1,50m avec, à son toit, une surface durcie à encroûtements d'huîtres.

L'ensemble de la série peut être réduit à quelques mètres ou même disparaître sous l'effet de la transgression du Cénomani.

**e)- Le Cénomanién**

C'est un ensemble calcaire de 250m à 300m d'épaisseur qui débute par des biosparites à *Rudistes* dilacérées et *Orbitolines* roulés. Les 60 premiers mètres montrent des bancs massifs incolores et localement rubanés. La série devient micritique vers le sommet avec des calcaires quelquefois noirs fétides à abondante microfaune benthique : *Chrysalidina gradata*, *Cisalvéolina fallax* ... Le Cénomanién est nettement transgressif au djebel *Oum Settas*. Il repose sur l'Aptien par l'intermédiaire d'une surface durcie. (Aris -1994).

**f)- Le Turonien**

Les dépôts du Turonien sont *souvent indistincts* par rapport à ceux du Cénomanién; ils correspondent à une grosse barre d'environ 180m de *calcaires blancs* localement rubanés et à cassure grise. Ce sont surtout des calcaires massifs, clairs à *Rudistes* : *Radiolaridés*, *Hippurites* ; à minces intercalations de calcaires sombres. La microfaune contient des *Valvulammica*, des *Milioles*...

**g)- Le Sénonien, avec :**

- Le *Sénonien inférieur* comprend une épaisse série de marno-calcaires et de marnes à *Huîtres* à *Globotruncana*, dans laquelle sont localement signalés des niveaux à *Ammonites* et. Les niveaux de base sont quelquefois bréchifiés et montrent des surfaces de ravinement. Cette formation est *absente de l'ensemble Oum-Settas/Mazela*.
- Le *Sénonien supérieur* est essentiellement marno calcaire et présente quelques minces passées de micrite grise ou jaunâtre (rocher de Constantine). Il débute par une discontinuité importante caractérisant une surface d'érosion d'extension régionale [Chadi, 1991- (in Aris, 1994)] et recouvre en discordance plusieurs terrains antérieurs d'âges différents. La présence de *Rota Lina*, *Hétéro hélix sp*, *Hedbergella sp*, permet de dater le Sénonien supérieur.

**7.2.1.3. Le Paléogène**

Le passage entre le Maestrichtien et le Paléocène n'est pas net. Cet ensemble comporte à la base, une série marneuse parfois noire, épaisse d'une centaine de mètres où s'intercalent des niveaux de calcaire à boules jaunes, lesquels sont suivis par des calcaires à concrétions phosphatées et des marnes (Paléocène).

Ensuite viennent sur près de 200m : des marno-calcaires, des calcaires bitumeux à rognons et lits de silex noirs puis des calcaires phosphatés se terminant par une puissante série de marnes brunes à passées calcaires jaunes, parfois lumachelliques attribuées à l'Yprésien-Lutétien (Eocène).

Enfin viennent des marnes grises à verdâtres sur lesquelles reposent une cinquantaine de mètres de grès parfois quartzifères. Les marnes ont livré une microfaune à *Globigérina* de l'Oligocène.

#### 7.2.1.4. *Le Néogène, avec :*

- Le Miocène marin qui comprend de puissantes séries marines, transgressives, formées de grès, de calcaires gréseux à pectinides et de marnes livrant une microfaune caractéristique.
- le Mio-Pliocène Continental : avec des faciès variés comportant d'abondants éléments détritiques. Les affleurements pliocènes montrent des argiles, des marnes gypsifères, des calcaires lacustres, des conglomérats, des grès et des sables.

### 7.2.2. Données structurales et paléogéographiques

Les unités structurales individualisées au cours de l'orogène alpin d'Afrique du Nord forment un ensemble qui donne une configuration beaucoup plus complexe qu'un simple empilement de nappes.

#### 7.2.2.1. *Les évènements structuraux majeurs (Vila, 1980 ; Aris, 1994)*

Parmi les phases tectoniques qui ont affecté la région de Constantine se dégage la chronologie suivante :

##### a-) les phases crétacées

Elles résultent de la superposition de deux évènements :

- une distension N120°E, généralement E-O, d'âge Albien-Vraconien ayant généré des failles N45°-60°E (NE- SO) antérieures à la transgression sénonienne.
- Une compression N-S sénonienne qui est à l'origine d'un plissement E-O, avec re-jeu d'anciennes failles NE-SO qui deviennent inverses et décrochantes. Ce plissement est associé à la mise en place de surfaces d'émersion.

Les structures résultant de ces deux épisodes tectoniques sont observées au niveau de l'ensemble *Oum-Settas / Mazela*.

##### b-) la phase fini lutétienne (Eocène)

Elle est essentiellement marquée par un raccourcissement, ou une compression N120°E selon Aris (1994)...se traduisant par des failles inverses N-S associées aux re-jeux des anciennes failles NE-SO.

##### c-) la phase Miocène

Elle est à l'origine d'un important raccourcissement N-S, responsable des vastes recouvrements anormaux selon une vergence Sud, confirmée par de nombreux auteurs. Cette phase a généré des plis serrés associés aux accidents N45° et N60°E. C'est la phase tortonienne post nappes de charriages.

##### d-) la phase alpine

Cette phase, où se poursuivent les grands chevauchements qui ont débuté antérieurement, est considérée responsable du cisaillement général à la base des diverses unités. C'est elle qui est à l'origine du désordre dans les structures de détail des nappes telliennes.

**e-) les phases Plio-Quaternaires**

Elles caractérisent une vigoureuse néotectonique qui est responsable de l'orographie actuelle : comblement des bassins mio-pliocènes alimentés par l'érosion, formation des plis à grands rayons de courbure, distensions à l'origine de vastes failles qui mettent en relief la nappe néritique constantinoise, rares compressions cisailantes...Le Quaternaire voit se poursuivre ce type d'évolution.

**7.2.2.2. Reconstitution paléogéographique : (Aris, 1994)**

L'empilement précédemment évoqué résulte d'une suite d'évènements qui se sont succédé depuis le Lias ou même le Trias. Mais ce n'est qu'au Jurassique moyen et supérieur qu'apparaît une différenciation entre la plateforme carbonatée constantinoise et le domaine atlasique où s'opère une sédimentation pélagique et siliceuse. Le passage Jurassique - Crétacé voit s'accroître la différenciation. Le domaine Péni-tellien et la bordure septentrionale de la plateforme constantinoise voient s'installer un régime bathyal à Calpionelles. L'essentiel du domaine néritique constantinois ne subit aucun changement et voit se poursuivre une sédimentation carbonatée massive. A sa bordure méridionale s'installe un régime de hardground.

Au Néocomien se poursuit la sédimentation carbonatée qui va devenir de plus en plus épaisse jusqu'à l'Albien – Cénomaniens inférieur où se produit l'arrêt de cette sédimentation.

Au Cénomaniens moyen et supérieur, la limite sud du sillon tellien voit réapparaître la sédimentation pélagique avec une mince intercalation à Caprines.

Le Cénomaniens est localement transgressif sur le domaine néritique constantinois.

Le passage Cénomaniens – Turonien correspond à une sédimentation instable au djebel *Oum Settas* et aux abords de Constantine ; les faciès néritiques se poursuivent au Cénomaniens supérieur.

Le Sénonien permet de faire la zonation la plus complète; sur la plateforme néritique, ses formations sont transgressives, assez incomplètes et minces. Le rocher de Constantine en est la plus belle illustration.

Si l'Eocène est inconnu au niveau de la plateforme constantinoise, au Priabonien se produisent vraisemblablement les premiers charriages avec l'avancée des nappes telliennes sur le domaine néritique constantinois entraînant les plissements suivant la direction NE– S O.

C'est la phase atlasique à laquelle succède une paléogéographie nouvelle.

De l'Oligocène jusqu'au Burdigalien moyen, il ne s'est développé aucune structure significative à l'échelle de toute la région.

Mais au Burdigalien supérieur la mer revient en transgression et fait reprendre une sédimentation généralisée dans tout le Nord de la région où des témoins se reconnaissent dans la partie Sud des formations néritiques constantinoises.

La phase alpine a créé l'essentiel des structures actuellement visibles. Tout le reste de l'évolution s'est développé à une échelle plus vaste, continentale.

Au Mio – Pliocène et au Quaternaire, poursuite des dépôts continentaux portant des traces de tectoniques verticales importantes et de compressions modérées.

Des nuances à l'interprétation de cette reconstitution étendue à tout le bassin méditerranéen sont apportées depuis ; Elles sont l'œuvre d'auteurs dont nous citerons : Bouillin (1986) ; Frizon de Lamotte et al, (2000) ; Rosenbaum et al, (2002)...

*En conclusion, la nappe néritique constantinoise est ainsi mise en évidence, avec quelques indications sur ses relations avec un avant pays plus différencié que dans la région occidentale voisine (région de Sétif). A l'Est, les formations néritiques disparaissent sous d'autres charriages...*

*L'étendue d'un tel domaine, la complexité de ses structures font que les formations rencontrées à l'Oum Settas et à Télioualt présentent des nuances que nous examinerons dans les contextes respectifs de ces sites.*

## **Chapitre 8 : DONNEES SUR LES CARRIERES ETUDIEES**

### **8.1. Considérations préliminaires**

Les calcaires (et dolomies plus ou moins génétiquement affiliées), sédiments continuellement déposés en milieu marin, lacustre ou fluvial se sont mis en place, dans les marges euro-africaines, surtout durant les périodes de transgression marine [Ordovicien : environ 425 millions d'années (MA)], Jurassique (environ 135 MA), Crétacé (environ 125 MA) et localement Tertiaire (depuis 60 MA).

Tel sont les cas, comme nous l'avons vu en Algérie du NE, pour les calcaires de la série du Safia (Jurassique) ou ceux de l'Oum Settas (El Khroub) dont le dépôt exploité est daté Cénomano-Turonien (Crétacé final). Pour la dolomie, les dépôts du massif de Téioualt (Aïn M'lila) remontent au Néocomien voire à la fin du Jurassique.

En fait, les carbonates les plus recherchés pour fabriquer de la chaux sont ceux dont le contenu en  $\text{CaCO}_3$  [ou en  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ] est très élevé tout en ayant un minimum d'autres éléments accompagnateurs (Lhoist, 1992 ; Claude, 1994...). Cette combinaison n'est pas très courante mais elle peut se trouver :

- Soit parmi les calcaires construits en dalles ou en récifs par des polypiers, des rudistes, algues, coquilles d'animaux marins morts.
  - Soit parmi les calcaires bio-détritiques comme les craies, dus à la sédimentation d'organismes planctoniques et benthoniques (mollusques, oursins...) et rencontrés dans les régions crayeuses.
  - Soit parmi les calcaires d'origine biochimiques, issus de la précipitation directe de carbonates de Ca (ou de Ca et Mg) en milieux divers. Ils sont dus à des facteurs physiques ou biochimiques variés: calcaires lacustres, tufs, travertins des sources, concrétions...
- Cette concentration majoritaire en  $\text{CaCO}_3$  [ou en  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ] confère à ces carbonates de nombreuses caractéristiques spécifiques dont les qualités se répercutent directement sur celles des chaux produites (chaux aériennes surtout).

Ainsi la constitution géologique du carbonate est primordiale à la fabrication de la chaux.

*Les sites étudiés n'ont pas eu tous, dès le départ, vocation à produire de tels « géomatériaux ». Mais avec des qualités acceptables et des réserves suffisantes, la production de chaux devient envisageable surtout si des explorations additives seront menées, quelquefois en extension ou dans le prolongement de certains sites déjà exploités. Si cette revalorisation des potentialités existantes n'est pas retenue, le choix d'un nouveau site devra être fait avec une connaissance suffisante de la matière première en termes de qualité, de distribution de cette qualité.... De plus, un minimum de 50 millions de tonnes de réserves avérées et homogènes est un des préalables qui justifierait les investissements destinés à l'implantation in situ de tels projets. Dans tous les cas, même si la taille est*

*conséquente, il serait utile de bien situer la distribution des impuretés, des accidents de qualité avant de conclure à l'exploitabilité de tels gisements destinés à la chaux.*

## 8.2. Carrières de calcaire la série du Safia

Sur la photo [Chapitre 7 Figure 2], apparaissent les trois carrières : (*Djendel* au N-O, *Ben Azzouz* au centre et celle de la *cimenterie* au S-E). A vol d'oiseau, elles sont distantes d'environ 3 km l'une de l'autre.

### 8.2.1. Carrière de calcaire de DJENDEL– Oued Noukhal (Arcelor-Mittal)

#### 8.2.1.1. Localisation, historique

➤ Comme les exploitations voisines, cette carrière est ouverte dans les affleurements calcaires (Fig.8.1), au sommet d'un dôme dominant les crêtes voisines du haut de ses 350 m d'altitude (à l'ouverture des travaux). Le « carreau » de la carrière se trouve à environ 170 m par rapport au niveau de la mer. Cette différence d'altitude reflète inégalement la puissance des formations carbonatées en cours d'exploitation.



Fig. 8.1- Photo GOOGLE (2011), montrant la carrière de Djendel :

➤ Ses coordonnées Lambert, au centre du gisement sont :

{	X = 401	Carte topographique FILFILA 1/25000
	Y = 902	

Les travaux ont démarré à partir du flanc SO et s'acheminent vers le NE. Le site est assez fortement boisé en chêne lièges et autres arbustes et herbes hautes. Il possède un réseau hydrographique saisonnier. Le climat est de type méditerranéen : hiver doux et pluvieux, été chaud et humide.

➤ Ancienne concession accordée aux entreprises COSIDER puis COPROSID (Anciennes sociétés étatiques d'exploitation de la carrière de DJENDEL), depuis le milieu des années 1970 pour produire des granulats et surtout pour alimenter le complexe sidérurgique d'El Hadjar (SNS) en *castine* (fragments grossiers de calcaire cru) pour son haut fourneau et ses fours à chaux. Elle est passée entre les mains du géant de l'acier ARCELOR-MITTAL qui l'exploite à partir de 2001, en même temps que le dit complexe, surtout pour les besoins de la sidérurgie.

Durant les phases de prospection et de recherche sur les massifs du Safia plusieurs sondages et travaux de surface ont été réalisés, certains par SONAREM (ex ORGM). Ce qui a permis d'estimer les réserves exploitables de calcaire à plus de 75 millions de tonne (Générale environnement, 1998) ou à plus de 33 millions de m<sup>3</sup> (Rapport Djeridi, 2008). Une moyenne ne dépassant pas les 150000 tonnes tous produits confondus est livrée chaque année.

Dès avant 2007, l'exploitation se trouvait au sommet de la topographie, au NE de la station de concassage et à environ 3km de celle-ci. Auparavant, une carrière a été ouverte plus bas, sur le même itinéraire et à environ 1 km avant d'arriver aux fronts de taille actuels. Ce chantier a été abandonné en raison de la mauvaise qualité du produit destiné à la sidérurgie.

### **8.2.1.2.      *Aperçu géologique du site***

Plusieurs sondages ont été réalisés par So.na.rem (ex ORGM : organisme de recherche géologique et minière) dès 1972. Deux sondages (S1 et S2) parmi au moins quatre réalisés sur le site de Djendel, traversent la carrière (Fig.8.2)

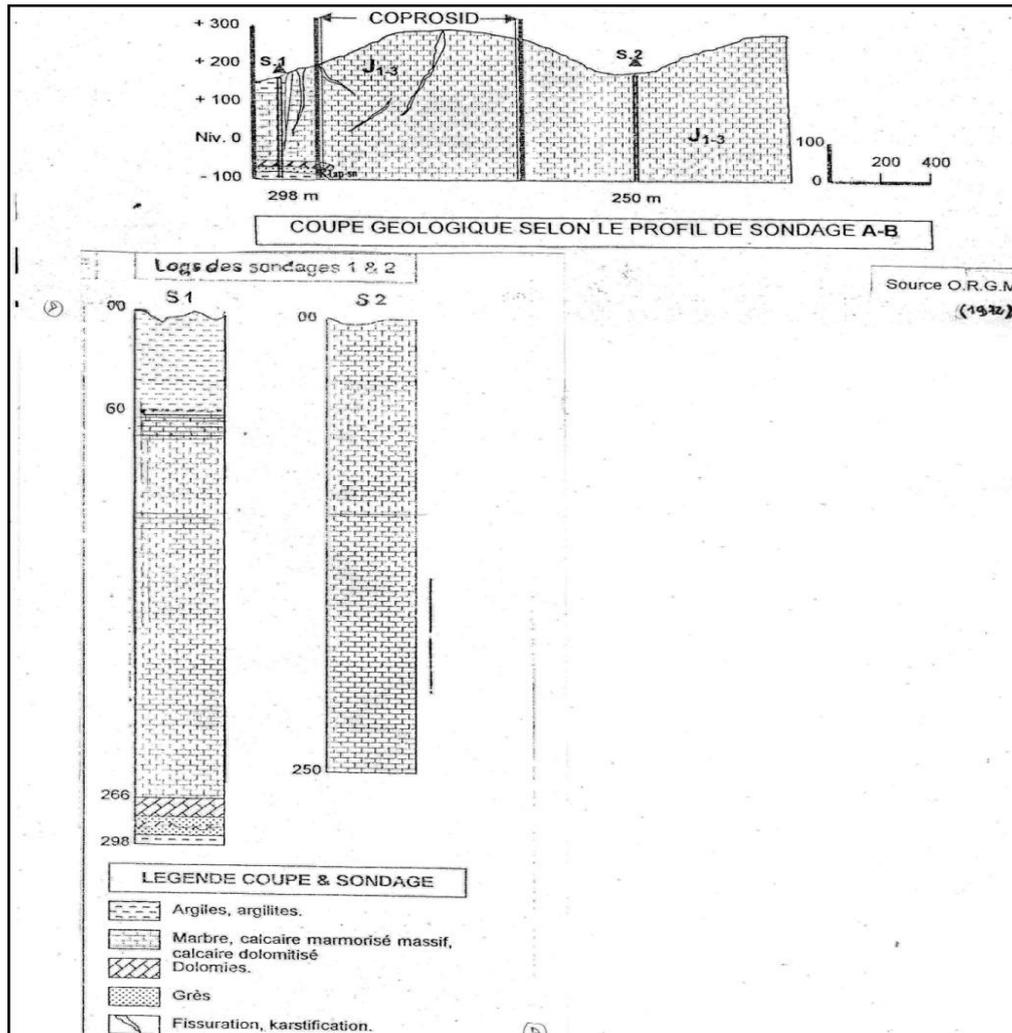


Fig.8.2) - Profil géologique E-O, passant par les sondages S<sub>1</sub> et S<sub>2</sub>, DJENDEL.

Ces sondages révèlent- à des profondeurs dépassant les 250 m- la succession suivante avec de bas en haut :

- Une assise marno-argileuse et argilo-calcaire varicolore à niveaux gréseux surmontée par des niveaux dolomitiques (apparaissant dans un des deux sondages) sur 60m à 80m et attribuée au Néocomien. Ils sont surmontés par :
- Des dépôts carbonatés calco-dolomitiques puis calcaires sur plus de 200m, montrant au départ des calcaires fins, compacts gris plus ou moins foncés, finement mouchetés puis, plus haut, devenant gris-rosâtres à rosâtres ou rose-beige à grain fin et grossier. Ces dépôts admettent de petites couches de marnes roses à nuances brunâtres. Ils sont attribués au Néocomien.  **Ils constituent la partie exploitée de la carrière.**
- Des formations de l'Aptien-Sénonien qui débutent avec des grès quartzeux, admettant des lentilles d'argile et d'aleurolite, surmontent l'ensemble précédent. Elles sont suivies par des marnes calcaires et de dolomies presque noires rencontrées sur près de 100 m (signalées

dans la vallée de l'oued El Hadjar). Plus haut, la série gréseuse de l'*Aptien- Sénonien* montre des variétés bréchiques, des argilites avec des petites lentilles de dolomie noires. L'ensemble repose en discordance sur les dépôts du *Jurassique*. Le tout est recouvert par des alluvions récentes, argiles...

Au niveau de la carrière, les argiles de couverture sont brunes mais surtout rougeâtres. Elles pénètrent profondément dans les fentes et fractures ouvertes dans le calcaire karstifié et l'imprègnent fortement.

Les étages supérieurs, ouverts dans la partie N E de celle-ci, montrent sporadiquement des bancs calcaires de stratifications d'inégales épaisseurs (pluri dm à infra métriques).

Ces bancs amorcent, de part et d'autre des niveaux d'exploitation, les courbures de la charnière de l'anticlinal du massif et prennent sa forme.

Ces bancs, faillés, décalés voire déboîtés, disparaissent souvent, ce qui rend difficile leur suivi sur de grandes distances.

### 8.2.1.3. Résultats des prospections antérieures :

#### a)- Essais physico-mécaniques

Seuls quelques résultats d'essais mécaniques réalisés en 1999 par le LTPE (laboratoire des travaux publics Est, Constantine) sont disponibles. Le nombre d'échantillons impliqués, leurs provenances, le mode opératoire adopté ne sont pas indiqués. Donnons ces résultats à titre indicatif dans le tableau (Tab.8.3) suivant :

Désignations des essais	Résultats			Spécifications
-Los Angelès (%) (sur 10/25)	21,16	24,42	230,1	Bon pour les béton et les corps de Chaussées
-Micro-Deval Humide (%) (sur 10/14)	17,0	18,4	17,40	TRAFIC T <sub>0</sub> (>750PL/j)
Essai de Propreté (%)	2/15=0,8 15/25=06			≤2 béton et corps de chaussées ≤1 Enduit sup. T <sub>1</sub> (150à300PL/j)
-Coefficient d'Applatissement (%)	2/15=36,18 15/25=25,86			≤30 pr trafic faible ≤25pl/j ≤25 " T <sub>1</sub>
-Masse Volumique absolue (kg/m <sup>3</sup> )	0/3=2,681 3/8=2,702	2/15=2,719 15/25=2,706	20/40=2,71	Granulats courants
-Masse volumique apparente (kg/m <sup>3</sup> )	0/3= 1,389 3/8=1,350	2/15=1,398 15/25=1,435	20/40=1,40	" "
-Equivalent de Sable (%)	28,5	28	-	≥50 corps de chaussées ≥75 Bétons

Tab. 8.3- Résultats d'essais physico-mécaniques sur Echantillons de Djendel (LTPE, 1999).

#### b)- Analyses chimiques antérieures

Des analyses sont effectuées sur de la roche concassée destinée à la sidérurgie (castine). Elles sont données à titre indicatif (Tab.8.4). Ni les lieux de prélèvement, ni le mode opératoire utilisé ne sont connus.

CaCO <sub>3</sub> CaO(*)	R** Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	SiO <sub>2</sub>	MgO	Insolubl es	Sulfate	CO <sub>2</sub>	PAF	Source - date
96.26	Traces	-	-	0.45	Traces	42.35	38.75	LNTPB- 1997
57.81(*)	1.17 *	0.43	0.24	-	-	33.71	39.27	Coprosid 2005

Tab. 8.4) - Analyses chimiques calcaire de Djendel (Dosages en %)

$$**R = Fe_2O_3 + Al_2O_3$$

**NOTE:** les spécifications techniques recommandées pour la castine destinée à la sidérurgie (*Arcelor-Mittal*, 2001) sont de recevoir un produit propre (sans argile ni sable), de composition idéale :

- **Chimie:** CaO > 53%; PF < 43%; SiO<sub>2</sub> < 1%; MgO: traces; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: traces; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> traces; S < 0.02%; Humidité < 4%.
- **Granulométrie:** castine arrivée à l'usine et transférée aux fours : 20-50 mm; humidité : < 7%.

## 8.2.2. Carrière de calcaire de BEN AZZOUZ- Si Messaoud (ENG)

### 8.2.2.1. Localisation, historique

➤ Le djebel Si Messaoud (+285m) où se trouve la carrière de Ben Azzouz est un des monticules orientaux de la série du Safia [prolongé au SE par le djebel Safia S.S. (+350m)]. Au S.O, la dépression d'Azzaba constitue une voie naturelle, empruntée par la voie ferrée, la route nationale Constantine-Annaba (RN 44) et bientôt l'autoroute Est-Ouest. Une route secondaire venant du village de Djendel passe à proximité de la carrière pour joindre la RN 44 pouvant passer par le village de Ben Azzouz, situé à 8km au NE.

**Ses coordonnées Lambert** X = 905m (Carte topographique, Filfila n°17,

Au centre du gisement sont : Y = 400m feuille 7-8, au 1/25000)

La carrière apparaît avec deux prises de vue : l'une aérienne (photo Google, 2011) et l'autre au sol ; dirigée vers le sud-est (Photos 8.5a et 8.5b).



Photo 8.5a- Carrière de Ben Azzouz, photo Google, 2011.

Comme pour les massifs voisins la végétation à chêne liège et autres arbustes est dense. De nombreux torrents traversent le monticule et peuvent rentrer en crue pendant les pluies d'hiver ou de printemps.



Photo 8.5b- Carrière de Ben Azzouz, vue vers le SE (2007), avec gradins numérotés N 217... Les flèches indiquent le sens de l'échantillonnage qui est aussi le sens de progression de l'exploitation.

➤ La prospection et des recherches préliminaires ont été menées par des équipes de la DREG (Ancienne division de l'ORGM) entre 1976 et 1977. A partir de travaux de surface (profils avec puits et tranchées) et sondages, ces recherches concluent à l'exploitabilité du site en estimant les réserves de calcaires tous usages confondus à plus de 66 millions de tonnes. Ce « géomatériau », aujourd'hui exploité par l'ENG (Entreprise Nationale des Granulats) est surtout commercialisé comme granulats mais il peut aussi présenter des qualités pour sa transformation en chaux. Le complexe sidérurgique d'El Hadjar l'utilise comme appoint à celui de Djendel pour les besoins du haut fourneau et pour ceux des fours à chaux.

8.2.2.2. *Aperçu géologique du site*

➤ *Lithostratigraphie (Fig.8.6)- (DREG et Obs. pers.)*

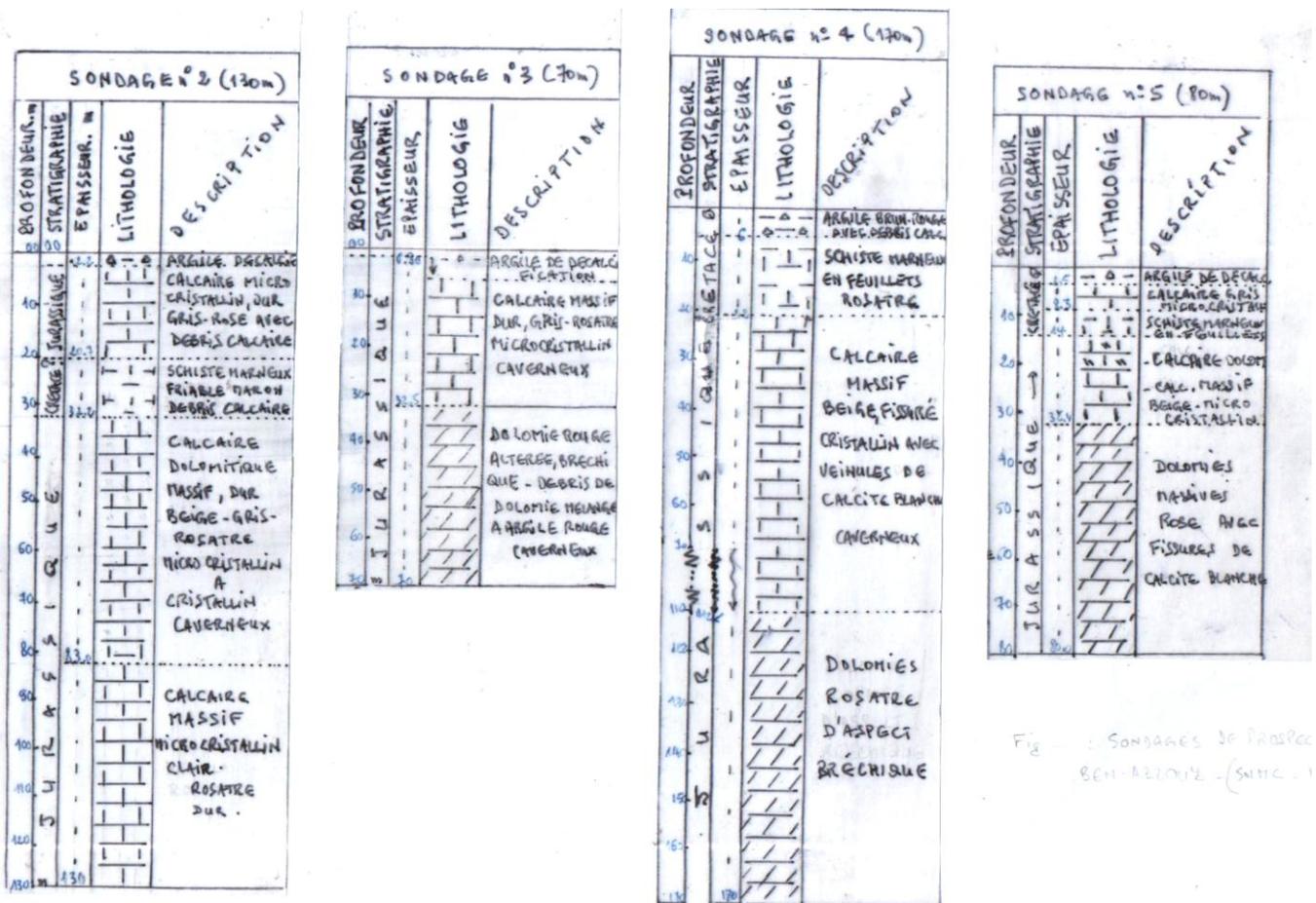


Fig. 8.6- Reconstitutions lithologiques de quelques sondages à Ben Azzouz (d'après données DREG-SNMC, 1978).

Le cœur de l'anticlinal de Ben Azzouz- aujourd'hui exploité- comprend une succession plus ou moins lacuneuse par rapport à la série avec :

- Un soubassement paléozoïque peu connu (*Permo-Trias?*), surmonté par :

- Une série carbonatée, dolomitique à la base avec dolomies massives, parfois bréchiques, puis calcaire avec une zone de transition calco dolomitique (signalée dans des sondages). Cette série attribuée au *Jurassique-Lias* comporte des calcaires massifs aux litages peu apparents dont les nombreuses diaclases et fractures donnent une pseudo-stratification (DREG. 1977/78).

Les calcaires sont micros cristallins à cristallins, durs, présentant diverses teintes beiges, grises, roses. Certaines variétés de ces calcaires sont fortement teintées en rougeâtres et montrent des formes d'altération et de fréquentes dissolutions de type karstique au nord de l'affleurement notamment (observations personnelles).

La stratification n'apparaît que sporadiquement au cœur du massif, ou près de l'affleurement au *SO*. Les mesures effectuées donnent des valeurs allant de  $N 100^{\circ}E$  à  $110^{\circ}E$  avec pendages entre  $25^{\circ}S$  et  $35^{\circ}S$  à *SO*. Bien qu'indiquant nettement la courbure de l'anticlinal à l'affleurement Sud, cette stratification qui montre parfois des joints argilo-marneux fins est difficile à suivre. Parfois elle est irrégulièrement déplacée par la tectonique ; parfois elle finit par disparaître comme pour fusionner dans le calcaire marmorisé, intensément fracturé.

- Dans les parties centrales et vers le *NE* du massif, ou encore vers le sommet il y a un ensemble marno argileux couvrant ou se mêlant avec les calcaires. La chronologie n'est pas aisée à établir, la fracturation, souvent masquée par l'exploitation, en est vraisemblablement responsable.
- Au sommet du massif succède une couverture schisteuse, pluri métrique au sud-ouest, aux teintes gris verdâtre, brun rose, brun bleuté (Observations personnelles-**Photos. 8.7a** et **8.7b**).

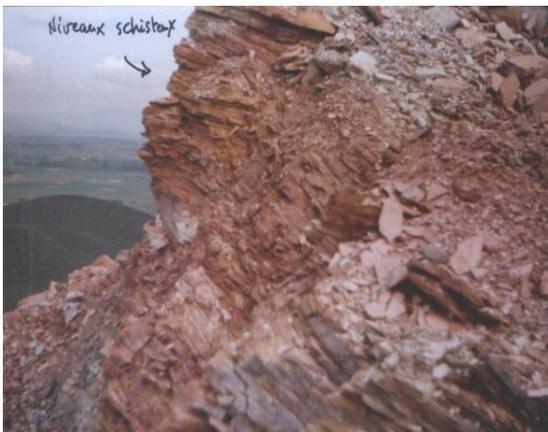


Photo.8.7a- Photo Niveau schisteux (4m)

Photo.8.7b- Photo Boudinage de calcite dans les schistes

Entre les plans de schistosité se répartissent quelques filons parfois pluri cm, étirés, biseautés de calcite (photo **8.7b**). Le contact de cette couverture avec les calcaires sous-jacents montre une discordance apparente.

➤ tectonique (Sonarem-1977 ; Obs. Pers.):

Le gisement de Ben Azzouz constitue une crête de calcaires liasiques alignés *NO-SE* qui sont encadrés au *NE* et au *SO* par des schistes et calcschistes du *Crétacé*. Il s'agit d'un « faux anticlinal » qui prolonge vers le *SE* l'anticlinal du djebel Safia.

Notons que les couches de calcaires et schistes sont affectées d'un pendage monoclinal de 20-35° vers le *SO*. La structure apparait comme un anticlinal déversé vers le *NE* et affectée par des accidents tectoniques en divers compartiments. Les calcaires sont limités du côté *NE* par une faille longitudinale qui met en contact anormal les formations jurassiques sur celles du *Crétacé*. An prolongement *SO* de ce contact, se trouve une autre faille longitudinale. La limite *NO* du gisement est marquée par une faille transversale. Au delà de cette faille, la structure géologique est encore plus complexe. La stratification des couches est peu apparente (SONAREM, 1977).

A partir de nos propres observations et des mesures effectuées sur les accidents cassants, au moins trois familles de fractures ont été identifiées :

- celles **N 140° E à 150°E**.
- celles **N 45° E**, plus ou moins verticales,
- celles **N 65°E à N 70°E**.

A ces fractures) plus ou moins ouvertes s'associent des argiles ocre et brunes quelquefois le long de simples diaclases ou plus souvent dans des zones de broyage et de dissolutions (karst) plus importantes. (Photos **8.8a** et **8.8b**).



Photo.8.8a-Calcaire impégné d'oxides de fer montrant des figures d'altération en boxwork.

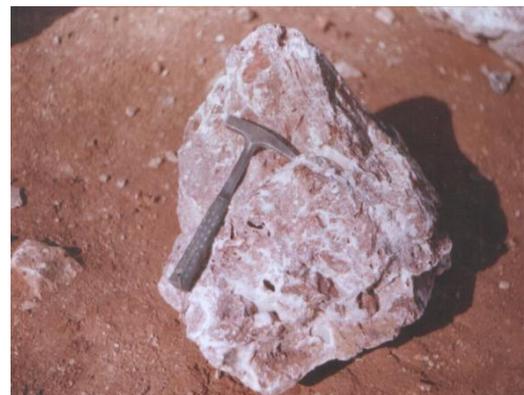


Photo.8.8b-Calcaire « karstifié » avec remplissage d'argile «rouille» dans des cellules rhomboédriques.

*Remarque*: ces niveaux argileux riches en oxydes de fer rencontrés dans les calcaires, les noyant parfois et surtout les rendant impropres à presque tous les usages.

### 8.2.2.3. Résultats des Prospections antérieures

L'échantillonnage, les analyses et essais réalisés en 1977, selon le mode opératoire adopté par l'entreprise SONAREM et utilisant les normes industrielles de l'époque ont permis d'obtenir les données suivantes :

a) Essais physico-mécaniques : (Tab.8. 9)

Valeur	Poids Vol (g/cm <sup>3</sup> )	Poids Spécif. (g/cm <sup>3</sup> )	Absorption eau (%)	Porosité (%)	Los Angelès (%)	Broyabilité (%)
Min	2.22	2.08	0.06	0.30	15.20	12.30
Max	2.83	2.88	8.19	18.30	40.00	26.70
<b>Moy.</b>	<b>2.66</b>	<b>2.74</b>	<b>0.77</b>	<b>3.17</b>	<b>22.68</b>	<b>16.35</b>

Tab.8. 9- Résultats des essais physiques sur le calcaire de Ben Azzouz (SONAREM - 1977).

b) Résultats des analyses chimiques (Tab.8.10)

Profil 3-3 (5 Echantillons) /Tous Profils et sondages (83 Echantillons)							
%	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Insolub.	P.A.F
Min	0.25	0.14	0.04	27.38	0.10	0.15	25.39
Max	1.10	1.09	2.31	55.60	20.18	41.10	48.01
<b>Moyen.</b>	<b>0.60</b>	<b>0.53</b>	<b>0.55</b>	<b>48.43</b>	<b>4.32</b>	<b>2.88</b>	<b>42.93</b>

Tab.8. 10- Analyses chimiques : calcaires de Ben Azzouz (SONAREM).

**Remarque** : Notons la grande variation dans les compositions. Cela est du à la présence de fréquents intervalles dolomités, reconnus dans certains profils et sondages ainsi qu'à celle des calcschistes découverts dans les sondages **S4 et S5**.

Pour SONAREM (1977), l'usage d'un tel calcaire pour fabriquer de la chaux n'était pas recommandé. Les parties du gisement en exploitation contiennent des passées dolomitiques significatives, qu'il faudra contourner et, en tout cas, éviter de livrer à la sidérurgie.

Cette précaution était prise puisque jusqu'à un passé récent, le calcaire de Ben Azzouz dessert en partie le complexe d'El Hadjar...

L'importance et l'homogénéité des dolomies sous les niveaux calcaires actuels restent à prouver. Dans le cas favorable, elles assureront la pérennité de la carrière.

### 8.3. Carrières de la série néritique constantinoise

#### 8.3.1. Carrière de calcaire de l'Oum Settas (El Khroub)

##### 8.3.1.1. Localisation – historique

- La carrière géante du Khroub, exploitée par l'Entreprise Nationale des Granulats (E.N.G.) dont le siège est à Alger, se trouve à quelques 24 Km au SE de Constantine et à environ 8 km d'El Khroub (ou *Le Khroub*), dans le massif de l'Oum Settas. Cette carrière est visible à la sortie Est du Khroub à partir de la route menant à Guelma.

Les coordonnées Lambert rapportées au centre du gisement sont :

$$\left\{ \begin{array}{l} X = 866.1\text{m} ; \\ Y = 334\text{m}. \end{array} \right. \quad [\text{Carte Géologique au } 1/50000, \text{ feuille n}^\circ 97 \text{ (Raven, 1957)}].$$

Avec une altitude dépassant les 1000m, le massif de l'Oum Settas est allongé grossièrement E-O. Le climat local est de type continental méditerranéen froid et humide en hiver, chaud et sec en été. Il tombe en moyenne 700 à 900 mm d'eau par an surtout en hiver et au printemps. Le ruissellement est rare sauf en période de crue. Le couvert végétal n'est pas dense.

- Initialement destinée à la production massive de granulats, ce gisement produit aussi, depuis de nombreuses années- à partir de sa zone centrale- de la poudre de carbonate de calcium de très bonne qualité.

L'Oum Settas a été prospecté par SNMC-DREG (Ex ORGM) dès les années 1970, à la recherche de substances utiles dont les granulats. Ces derniers devront couvrir les besoins de plus en plus grandissants de la région. La production démarra peu de temps après, sous la direction de l'ENG, avec un rythme progressant jusqu'à dépasser aujourd'hui le million de tonnes/an. Divers travaux et expertises, auxquels nous nous sommes référés, ont été réalisés.

##### 8.3.1.2. Aperçu géologique du massif de l'Oum Settas(Fig.8.11)

Limitée au seul Crétacé, l'étude des massifs de Bou Nouara, dont l'Oum Settas, permet par comparaison avec les autres massifs de la plateforme néritique constantinoise, de distinguer-au sein de cet étage- quatre ensembles lithostratigraphiques d'inégales importances (Aris-1994) :

- ❖ un ensemble calcaire homogène d'âge *Aptien* (E-I);
- ❖ un ensemble calcaire marneux ou glauconieux à Ammonites daté Albien sup. à Vraconien (E-II),

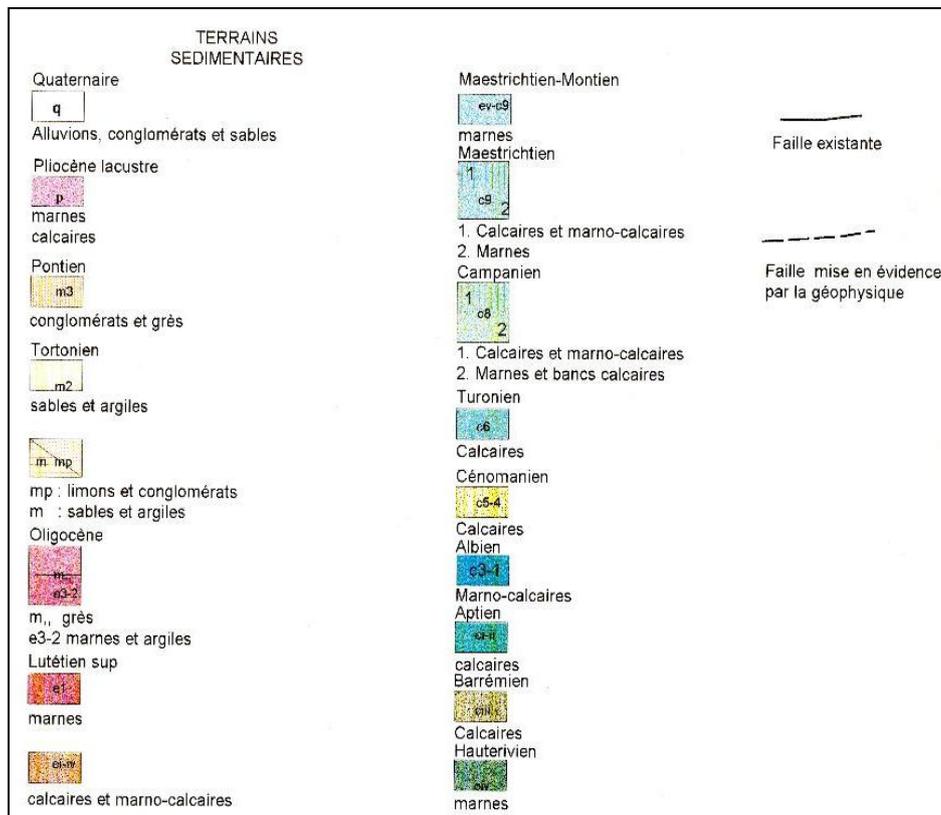
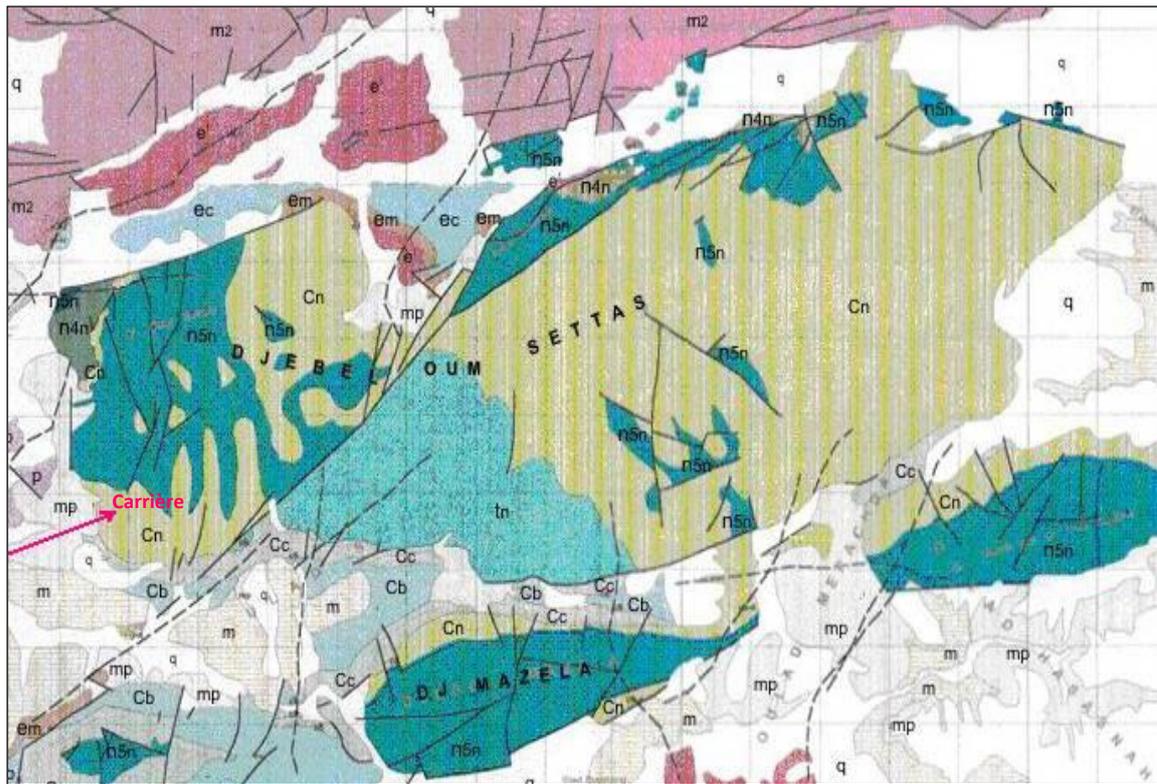


Fig.8. 11 - Carte géologique et structurale au 1/50000 de l'Oum Settas et légende (ANRH).

❖ un ensemble calcaire, d'âge *Cénomano-Turonien*, à débris de rudistes localement discordant sur les ensembles I et II. C'est l'ensemble E-III (*Aris*, 1994). Ce sont des calcaires biomicritiques en bancs centimétriques qui se poursuivent parfois par des calcaires gris à débris de Rudistes, quelquefois par des calcaires micritiques avec des microfaciès à pelletoides emballés dans un ciment micro sparitique, puis vers le sommet par des calcaires clairs de faciès lavés à Rudistes. Cet ensemble se termine localement par des marnes rubéfiées et des biomicrites à Rudistes.

Dans les dix derniers mètres, se rencontrent tantôt des *Caprinidae* et fossiles apparentés au Cénomaniens moyen et supérieur, tantôt et à quelques mètres latéralement d'autres espèces fossiles évoquant le Turonien.

L'examen des premiers sondages réalisés dans l'emprise du gisement, surtout près et dans la zone à calcaires blancs (*ORGM ex DREG- SNMC*), considèrent que les roches carbonatées de cet étage se subdivisent en deux séries (Fig.8.12):

➤ une série inférieure (**CM'**) de calcaires gris foncés à grains fins. Cette série est insuffisamment identifiée.

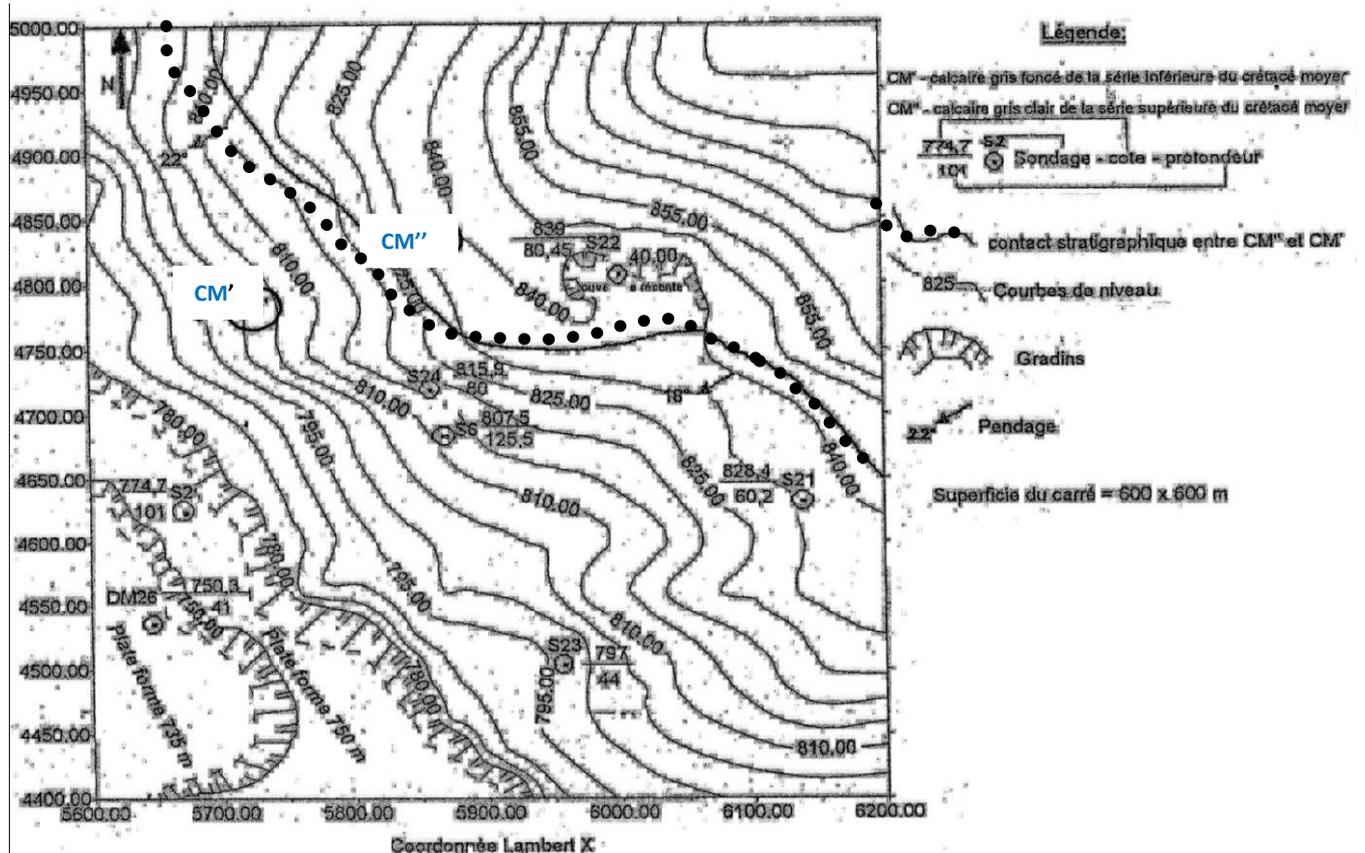


Fig.8.12 Partie de la carrière en début d'exploitation [sondages (S21...) et limites lithologiques **CM'**, **CM''**] [Omraci (ENG)-2001].

➤ une série supérieure (CM'') représentée par des calcaires gris clairs à grain fin « marmorisés ». Elle comporte des intercalations de calcaires gris foncé épais de 1 à 3m. La puissance de cette série varie de 60 à 90m.

❖ Un ensemble marno calcaire (E-IV), d'âge *Sénonien* supérieur, formant la couverture transgressive des ensembles I, II, et III et reposant sur eux par l'intermédiaire d'un niveau conglomératique ferrugineux, parfois à matrice marneuse.

Ces deux derniers ensembles forment l'essentiel du flanc sud de l'anticlinal de l'Oum Settas, où sont implantées la plupart des carrières en cours d'exploitation.

### 8.3.1.3. Résultats des travaux de recherche antérieurs

❖ **Campagne de prospection 1978 - (UREG-ENDMC, ex ORGM)**

Le gisement a été reconnu par 08 sondages verticaux (S1, S2, ...S8) totalisant plus de 700m et ont mis en évidence plus de 120 millions de tonnes de produit destiné aux agrégats. La distance inter sondages varie de 190m à 200m.

• **Essais physiques :**

Les valeurs moyennes de quelques paramètres physiques provenant d'essais réalisés sur 208 échantillons (171 échantillons de carottes de sondage et 37 pris en surface), sont résumées dans le Tab.8.13 suivant :

param. Phys	Poids volum. (g/cm <sup>3</sup> )	Poids spécif. (g/cm <sup>3</sup> )	Porosité totale (%)
Valeurs statistiques			
Moyenne	2,59	2,71	4,55
Ecart-type	0,078	0,037	3,00

Tableau 8. 13- Résultats d'essais physiques, 208 échantillons de l'Oum Settas (ORGM-1978).

**Ces résultats confirment la qualité du produit, lequel est également propice à la fabrication de ciment blanc.**

• Essai mécanique (d'usure) :

15 échantillons issus des sondages : 1, 2 et 8 ont été traités. Ils ont donné les résultats consignés dans le tableau suivant (Tab. 8 14)

Param. Physique Statistiques.	Essais Los Angeles (%)	Rendement d'agrégat (%)
Moyenne	16,97	76,52
Ecart-type	2,25	6,26

Tab. 8.14 - Moyenne des paramètres d'usure et de rendement d'agrégat (ORGM- 1978).

*Les résultats admettent une dureté et une compacité élevées. Les pertes de poids - en faibles quantités lors des essais Los Angelès - ont permis de constater la bonne qualité des agrégats de calcaire.*

• Analyses chimiques :

L'analyse à 08 éléments est réalisée sur 15 échantillons issus des sondages S1, S2 et S8. Les sondages n'ont été foré que dans les calcaires CM "de la série supérieure. Les résultats figurent dans le tableau (8.15) suivant :

Composant chim. Param. statistiques.	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	CaCO <sub>3</sub>	*PF
Moyenne	0,34	0,16	0,12	<b>55,30</b>	0,35	0,08	0,04	0,05	98,88	42,92
Ecart-type	0,33	0,21	0,14	<b>0,81</b>	0,42	0,04	0,04	0,01	1,05	0,37

\*PF : Pertes au Feu

Tab. 8.15 : Analyse chimique du calcaire (ORGM, 1978).

*Ces analyses indiquent un pourcentage élevé en CaO et une faible teneur en fer.*

❖ Données de la campagne 1991 : (UREG-ENDMC)

La blancheur du calcaire et sa haute teneur en CaO ont donné lieu à une nouvelle campagne de sondages afin de mieux caractériser le carbonate de calcium exploité. La zone du gisement, retenue pour la production de carbonate de calcium, a été délimité par 06 sondages (04 carottés

S21, S22, S23 et S24 et 02 destructifs DM25 et DM26). Ces sondages totalisent 345,65m ; dont 240m carottés.

La sélection de cette zone a été faite sur la base de sa position éloignée de toute fracture tectonique, loin des zones oxydées et en s'appuyant sur les résultats des analyses chimiques des campagnes de prospections précédentes. Elle a une forme carrée de 600m de côté et qui totalise jusqu'à la cote 750m, un volume de 60 millions de tonnes de calcaire (+ou - 31000t).

Sur le terrain, cette zone se trouve à l'est d'un accident tectonique bien matérialisé sur la carte géologique précédente (Fig. 8.12) coïncidant avec la zone du contact normal entre les deux calcaires CM' et CM'' et d'une faille remplie d'oxydes et d'argile très plastique, de direction NS, traversant l'excavation 734-780. Cette dernière n'est probablement plus visible aujourd'hui du fait de l'avancement des travaux d'exploitation entrepris depuis.

Le calcaire reconnu ici est massif, blanc à blanc grisâtre, très rarement traversé par des fissures renfermant de la calcite et de la limonite. Cette zone a une structure monoclinale dont le pendage est de 15° à 25° vers le S-O. L'épaisseur réelle de l'assise utile dépasse les 60m.

• Degré de blancheur :

Le test de blancheur a été réalisé sur deux échantillons broyés à moins de 63µm, dans un broyeur de laboratoire en céramique. Il a donné un taux moyen de 89% par rapport au sulfate de baryum (BaSO<sub>4</sub>).

• Analyses chimiques :

Le résultat des analyses effectuées à partir de 85 prélèvements sur les carottes de sondage est donné ci-après (Tableau 8.16):

Composant chim. (%) Param. statistiques.	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	CaCO <sub>3</sub>	*PF
Moyenne	0,34	0,16	0,12	<b>55,30</b>	0,35	0,08	0,04	0,05	98,88	42,92
Ecart-type	0,33	0,21	0,14	<b>0,81</b>	0,42	0,04	0,04	0,01	1,05	0,37

\*PF : Pertes au Feu

Tab. (8 16) : Analyses chimiques du calcaire Oum Settas (*campagne 1991*).

Ces données montrent clairement qu'il s'agit d'un calcaire blanc titrant à plus de 98% de CaCO<sub>3</sub>. Les chiffres sont significatifs car représentant un grand nombre d'échantillons.

Notons que les valeurs moyennes de CaO et de PF sont quasiment les mêmes pour les deux campagnes (1978 et 1991). Les valeurs des autres éléments analysés durant les deux campagnes restent comparables sauf pour l'oxyde de fer qui a donné des valeurs plus nuancées.

❖ **Données de la campagne 1999 (ENG) :**

Une nouvelle campagne de reconnaissance a été menée en 1999 pour mieux apprécier les zones à carbonate de calcium de haute qualité. Un plus grand nombre de sondages a été prévu tant dans la zone sud (maille de 25m x 25m) que dans la zone Nord (maille de 100m x 100m) du gisement. Ce programme n'a été réalisé que partiellement (35 sondages réalisés en zone « nord » et aucun des 171 prévus en zone sud).

• Degré de blancheur :

Les mesures ont été effectuées sur la fraction de 100µm, prélevés des cuttings à chaque mètre de sondage et cela pour les 35 sondages réalisés.

*La valeur moyenne du degré de blancheur est de 82.95% avec un écart type de 1.77 -*

• Teneur en CaCO<sub>3</sub>

Des prélèvements provenant de 12 sondages seulement (sur 35) ont fait l'objet d'analyses.

*La moyenne obtenue est 95.66 % de CaCO<sub>3</sub> pour un écart type de 1.15 -*

❖ **Etude de localisation des carbonates de calcium :** (Expertise **Omraci, ENG- 2001**)

L'étude se donne pour objectif de bien connaître la partie du gisement riche en carbonate de calcium afin de l'exploiter au mieux de sa rentabilité tout en veillant à obtenir un produit de grande pureté. Elle prend en compte les données des études précédentes.

Une démarche qui vise à établir un modèle géométrique du gisement par traitement informatique de données pour-proposer un schéma d'exploitation minière et de contrôle de qualité.

❖ Ce modèle s'appuie (Fig.8.12) sur des données topographiques (cartes, profils), géologiques (coupes, pétrographie : CM', CM'') et de sondages (positions, contenus chimiques...); ce qui a permis de construire grâce au logiciel *Winsurf* (Omraci, ENG) un modèle géométrique du gisement :

En bidimensionnel (2D) avec tracé (linéaire) du contact stratigraphique entre le niveau CM' et le niveau CM'' ainsi que l'implantation des sondages S1, S2...S8.

En tridimensionnel (3D, figure 8. 17) montrant la surface de séparation entre les calcaires de la série inférieure (CM') et ceux de la série supérieure (CM'').



La distribution des points de mesures rapportés à la profondeur montre une même tendance à la dispersion des valeurs dans les deux sondages S21 et S22. Ce qui conduit à admettre la présence d'une anomalie géochimique.

#### - Teneur en CaO

Les teneurs en CaO par rapport à la profondeur montre une tendance pratiquement constante pour les sondages S23 et S24 mais variable dans les sondages S21 et S22. Entre les cotes 770m et 810m l'on prévoit une diminution de la qualité du calcaire (Fig.8.18).

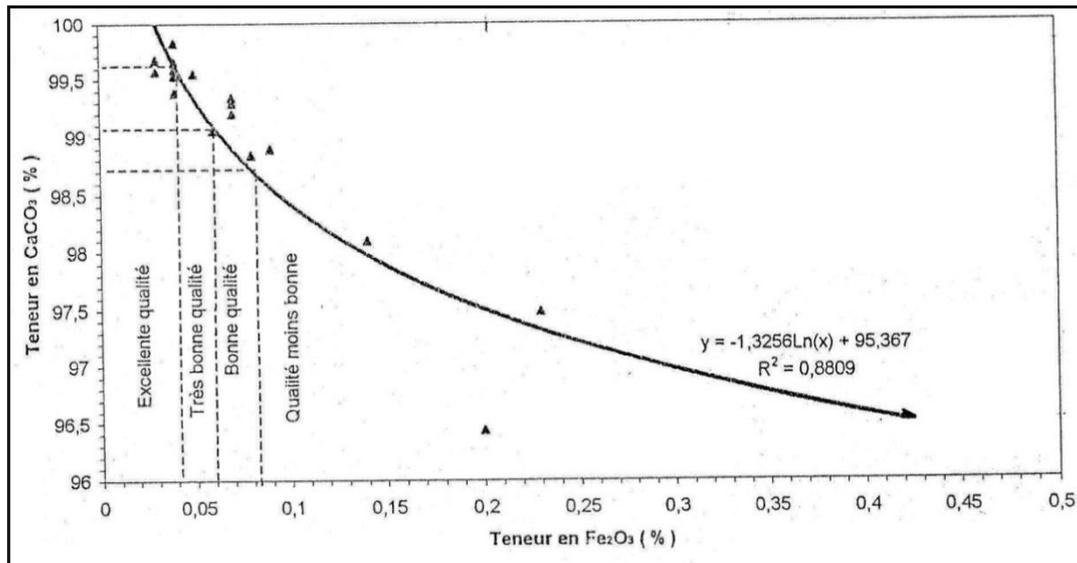


Fig.8.18-Variation de la teneur en  $\text{CaCO}_3$  avec la teneur en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (Campagne 1991, in Omraci)

Sur cette figure, notons l'antagonisme des comportements de  $\text{CaCO}_3$  et de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

La moyenne des mesures approche **les 56% en CaO**.

#### - Teneurs en $\text{Fe}_2\text{O}_3$ et $\text{Al}_2\text{O}_3$ :

La variabilité des teneurs en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  et  $\text{Al}_2\text{O}_3$  avec la profondeur montre trois tendances (Fig. 8.19):

Un premier groupe est formé par des valeurs très fortes de la teneur en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  et en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (sondages destructifs DM25 et DM26). Ce qui n'est pas tellement conforme à l'interprétation des logs de ces sondages, bien que sur terrain l'on observe de nombreuses fissures remplies d'oxydes de fer.

Notons que le résultat de lecture du log de sondage est très probablement lié au type de sondage (destructif) qui ne restitue pas de manière fidèle l'intégralité de la série lithologique.

Un deuxième groupe, formé par un ensemble de valeurs faibles et très stables de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (S1, S2, S23 et S24) ; ce qui est conforme à la lecture des lithologies des sondages montrant un calcaire gris clair à blanc, rarement fissuré.

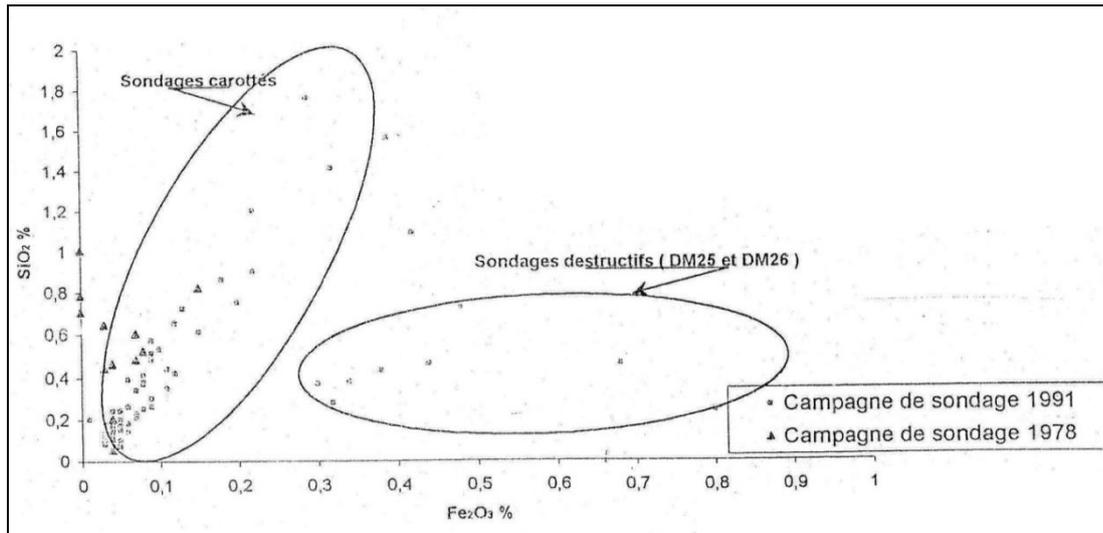


Fig.8.19 – Nuages de corrélation  $\text{SiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$ , réalisés en 2001. (Sondages Oum Settas).

Un troisième groupe montre une évolution de même type que celle observée pour les autres oxydes analysés auparavant, avec la même anomalie géochimique à la cote  $Z = 792\text{m}$  surtout au niveau des sondages S22 et S21.

En analysant la lithologie des sondages S21 et S22, à la profondeur de l'anomalie géochimique, on s'aperçoit que l'on a un calcaire cristallin grisâtre, affecté de stylolithes à taches noires de Mn et de fissures remplies d'oxydes ferriques.

#### • Paramètres de corrélation

Dans l'étude de 1999, l'auteur arrive à une distribution log normale des valeurs des teneurs en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , jugée conforme à la réalité observée dans beaucoup de cas... L'histogramme (figure 8.20) illustre cette répartition.

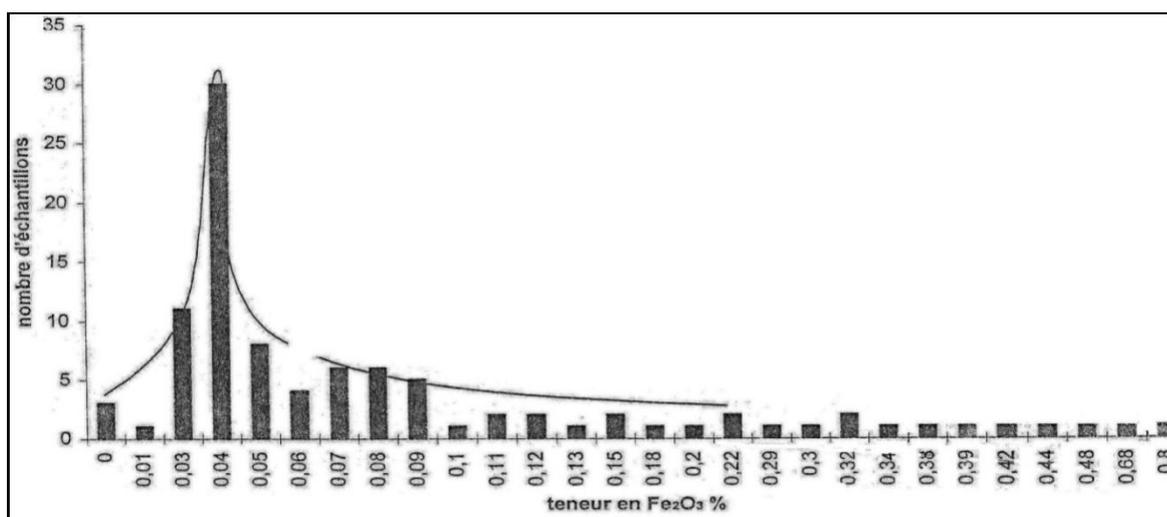


Fig.8.20- Type de dispersion log-normale des teneurs en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (Omraci,2001).

L'auteur propose des graphiques de corrélation mettant en relief les teneurs d'éléments significatifs par rapport à la profondeur, graphiques qui lui ont permis de proposer une cartographie des zones (zonographie) délimitant les parties géochimiquement favorables à l'exploitation du carbonate de calcium de celles qui ne le sont pas. Leur établissement s'appuie sur la méthode géostatistique de krigeage.

Par exemple en tenant compte de la proportion de l'élément colorant principal ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) dans le calcaire, la répartition qualitative suivante a été dégagée:

- ✓  $\% \text{Fe}_2\text{O}_3 \leq 0,04$  *carbonate de calcium d'excellente qualité.*
- ✓  $0,04 \leq \% \text{Fe}_2\text{O}_3 \leq 0,06$  *carbonate de calcium de très bonne qualité.*
- ✓  $0,06 \leq \% \text{Fe}_2\text{O}_3 \leq 0,08$  *carbonate de calcium de bonne qualité.*
- ✓  $\% \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 0,08$  *carbonate de calcium de moins bonne qualité.*

[0.04 %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (avec 0.12 %  $\text{SiO}_2$ ) est considérée valeur de référence du  $\text{CaCO}_3$  de REVERTE-SA-Espagne: (Omraci-ENG)].

De là, un cadrage du secteur destiné à l'exploitation du carbonate de calcium a fait l'objet d'une modélisation *en 3D* où cette partie du gisement a été découpée en zones. Ce découpage fait apparaître des courbes d'iso teneurs en fer (les oxydes ferriques étant responsable de la coloration qui pénalise la qualité des carbonates) établies dans le but d'aider l'exploitant à planifier ses priorités d'extraction (fig. 8.17).

Ce secteur a été ainsi subdivisé en quatre zones de qualités en rapport avec les teneurs en fer évoquées plus haut. Trois de ces zones seraient destinées à l'exploitation du carbonate de calcium.

Cette étude a sans doute permis à l'exploitant « d'élaborer un plan d'exploitation à moyen et long terme, disposant d'une représentation graphique ayant une bonne apparence sur le plan géologique des réserves et du matériau sélectionné pour une exploitation orientée future... » (ENG - 1999).

**Remarque :** *L'auteur de l'étude recommandait l'examen, à l'échelle du gisement, des accidents cassants (failles, diaclases, poches de dissolutions tel que karst) et leurs relations avec les venues ferrugineuses. Cela aiderait sans doute à trouver des solutions pour minimiser l'effet de ces dernières. Il a aussi préconisé l'implantation ultérieure d'au moins un sondage dans la partie nord, moins connue, du gisement.*

#### 8.3.1.4. *Etat actuel de la carrière*

**En 2012**, le chantier a évolué et l'exploitation a considérablement progressé, tenant sans doute compte de cette étude et des recommandations émises. La carrière continue à être exploitée de manière sélective avec prélèvement séparé et contrôlé des matériaux destinés à l'unité de carbonates d'un côté et au concassage des granulats de l'autre...L'avancement des travaux s'effectue toujours du sud vers le nord et d'Est vers l'Ouest. L'exploitation reprendra

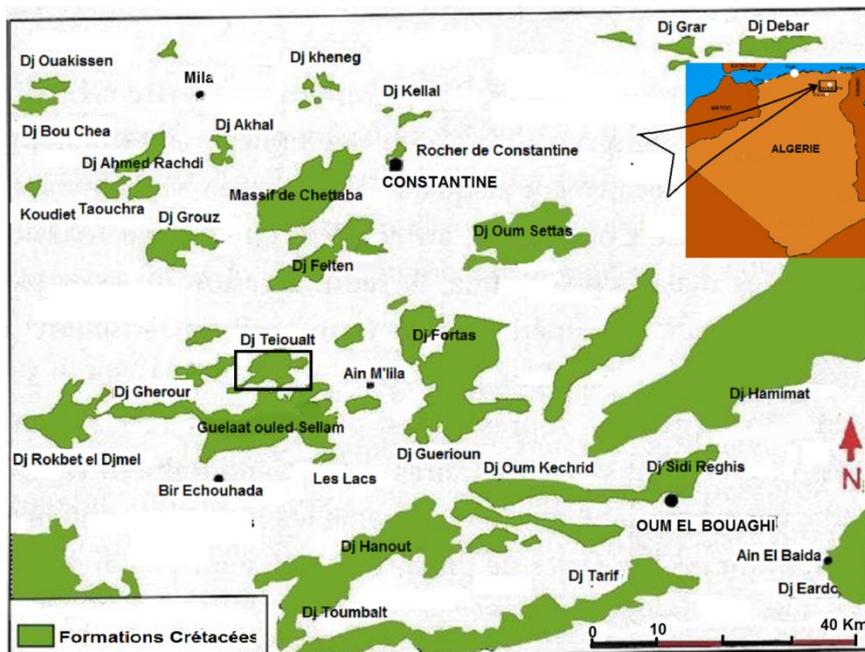
au sud, en élargissant les plateformes des niveaux de base (Niveaux 752,765, 780m...) dès que le sommet de l'aptien (limite Nord de la carrière) sera atteint.

Pour assurer la pérennité de la carrière, de nouvelles prospections devront être menées dans les niveaux carbonatés du Cénomano-Turonien encore affleurants dans les régions limitrophes.

### 8.3.2. Carrière de dolomie de Téioualt (Aïn M'lila)

#### 8.3.2.1. Localisation, historique

Le massif du Téioualt est situé à une quarantaine de km au SSO de Constantine, plus près de la localité de Téléghma que de celle d'Aïn M'lila (toutes deux traversées par l'axe ferroviaire Est-Ouest algérien). Il est allongé E-O (Fig.8.21) et fait partie des massifs méridionaux de la « série néritique constantinoise ».



**Fig.8.21-** Carte des formations du néritique constantinois avec position du massif de Téioualt (Vila-1978).

Les travaux de prospection sur les dolomies du Téioualt ont été l'œuvre de la *SONAREM* (Société nationale de recherche et d'exploitation minière : société étatique des années 1970) au cours des années 1976-77. Durant cette campagne, un levé géophysique par méthode électrique (SEV) ainsi que des prélèvements d'échantillons (à partir de tranchées et de 09 sondages profonds de 30m à 90m) ont été effectués. Ce qui a permis de configurer la structure du terrain et d'apprécier la qualité des dolomies exploitables.

#### 8.3.2.2. Données géologiques locales (Figure 8.22)

Le pays constantinois est caractérisé par un ensemble de reliefs qui forment l'unité néritique constantinoise à laquelle appartient aussi le massif de l'Oum Settas. Cette unité est composée

de massifs essentiellement carbonatés datés Jurassico-Crétacé constituant une plateforme surgissant en haut fond, surmontée par une couverture marno-calcaire et conglomératique d'âge Crétacé et post Crétacé. Dans le détail, cet ensemble montre un empilement d'unités charriées. Chaque unité se définit selon sa nature par son comportement, ses caractères de mise en place, ses types de déformations... L'ensemble donne une configuration beaucoup plus complexe qu'un simple empilement de nappes (*Aris- 1994, Bär- 1957, Coiffait et al.- 1975, Vila- 1978 ; 1980*).

Les mouvements ayant généré cette disposition remontent au Crétacé. D'autres phases ont suivi durant l'Eocène (Lutétien Tardif) et au Miocène. Durant la phase alpine de grands chevauchements ont été à l'origine de désordre dans la structure d'ensemble. Puis a succédé une déformation tectonique compressive à la limite du Plio-Quaternaire qui est considérée comme responsable de la topographie actuelle (*Marmi et Giraud, 2006*).

### • **Lithostratigraphie**

La Lithostratigraphie du secteur a été définie par **Bär, C.B** en 1957 à la suite d'un sondage (Synthèse *en figure 6 du chapitre 7*). L'analyse de celui-ci a montré que le niveau basal de ce massif est essentiellement constitué d'une puissante série (700m) de dolomies noires attribuées au *Valanginien*.

- Les dolomies sont surmontées par des biomicrites épaisses de 95m en bancs métriques bien individualisés.

Au toit de cette série dolomitique, on observe 150m de calcaire en petits bancs métriques, contenant une association de « coprolithes » marquant la limite *Jurassique-Crétacé* (*Schroeder et al.-1975*).

- Au dessus, viennent des dolomies alternant avec des micrites, sur une épaisseur d'environ 200 m. Elles sont attribuées à l'*Hauterivien*.

- Une puissante série calcaire succède ; elle est très massive et représente le *Barrémien* sur près de 420m d'épaisseur. Dans le détail, elle comporte:

- ⊕ à la base, sur 130m d'épaisseur, un dépôt de calcaires lités, massifs ;

- ⊕ suivi sur 45m à 50m par un niveau plus marneux à lamellibranches, qui est un niveau repère connu, jusqu'au Djebel Grar (à l'est de Constantine près de Guelma), par sa micro faune attribuée au *Barrémien*,

- ⊕ au dessus il y a 240m de calcaires fins à algues alternant avec des calcaires oolitiques et des calcaires à débris de rudistes, polypiers et autres débris de microfaunes marquant le sommet du *Barrémien* ;

• La série se termine par 160m de calcaires bien lités correspondant à l’*Aptien*. Ces calcaires sont plutôt micritiques, riches en miliolites, orbitolines et en débris de nature variée. L’*Aptien* terminal est daté par des niveaux à orbitolines et à alvéolines.

La formation du djebel Téioualt atteint au total une épaisseur de 1600m.

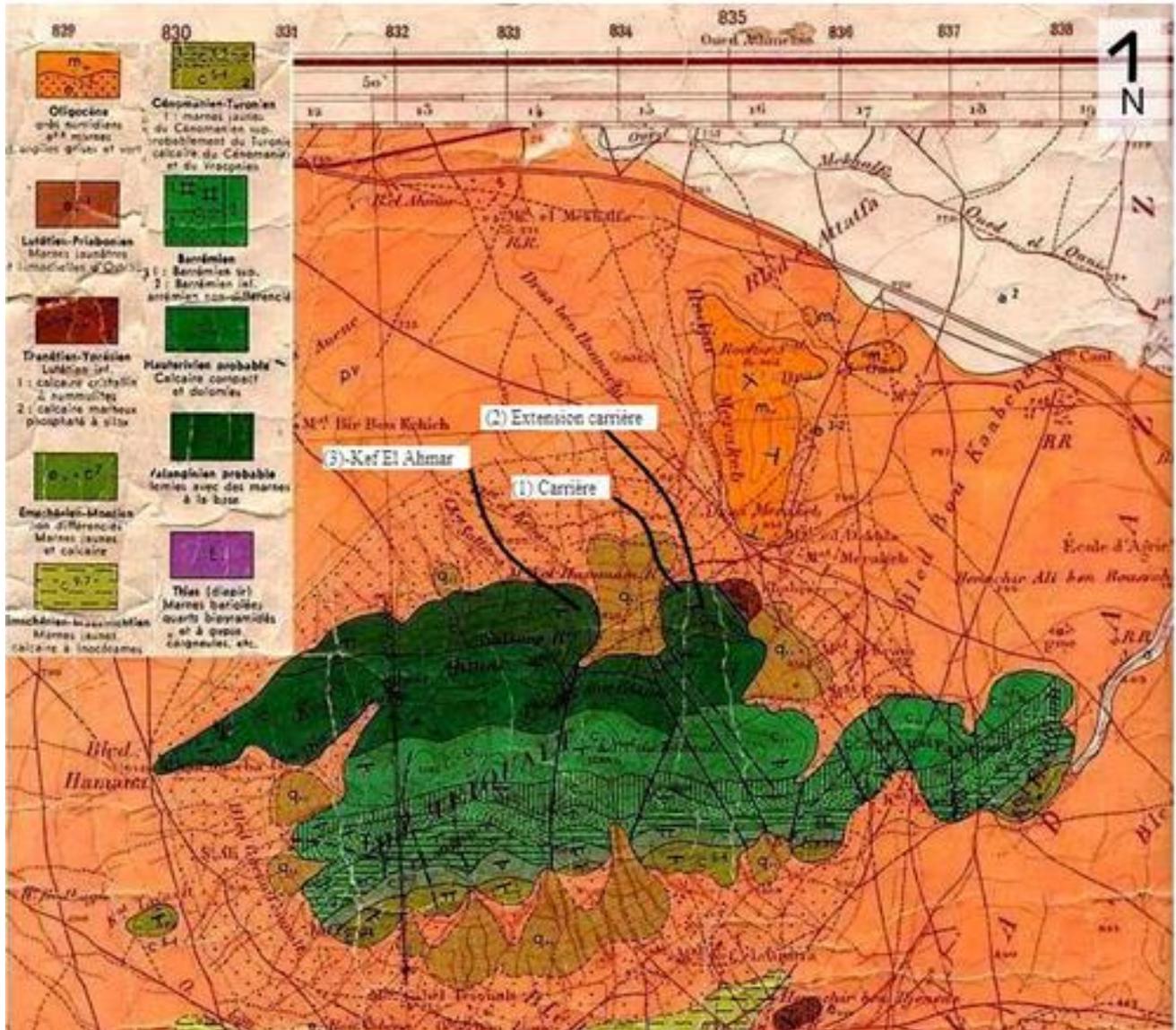


Fig. 8.22- Extrait de la carte géologique d’Ain M’lila (1/50000); Bär-1957), légende partielle.

### - Tectonique

Grossièrement allongé Est-Ouest, le Djebel Téioualt a une structure simple: c’est un monoclin où les couches affleurantes, dolomitiques à la base, plongent du nord vers le sud avec un pendage allant de 25° à 50° dans ce sens.

L’ensemble du massif est affecté par une tectonique cassante. Dans la partie orientale de celui-ci, le réseau de fractures rencontré comprend essentiellement des failles N – S à NO – SE (Fig.8.23). Localement, les failles ont joué en décrochement. La partie sud de ce

monoclinal, où démarre l'exploitation, est partiellement recouverte par des formations récentes au contact d'une faille masquée orientée E-O.

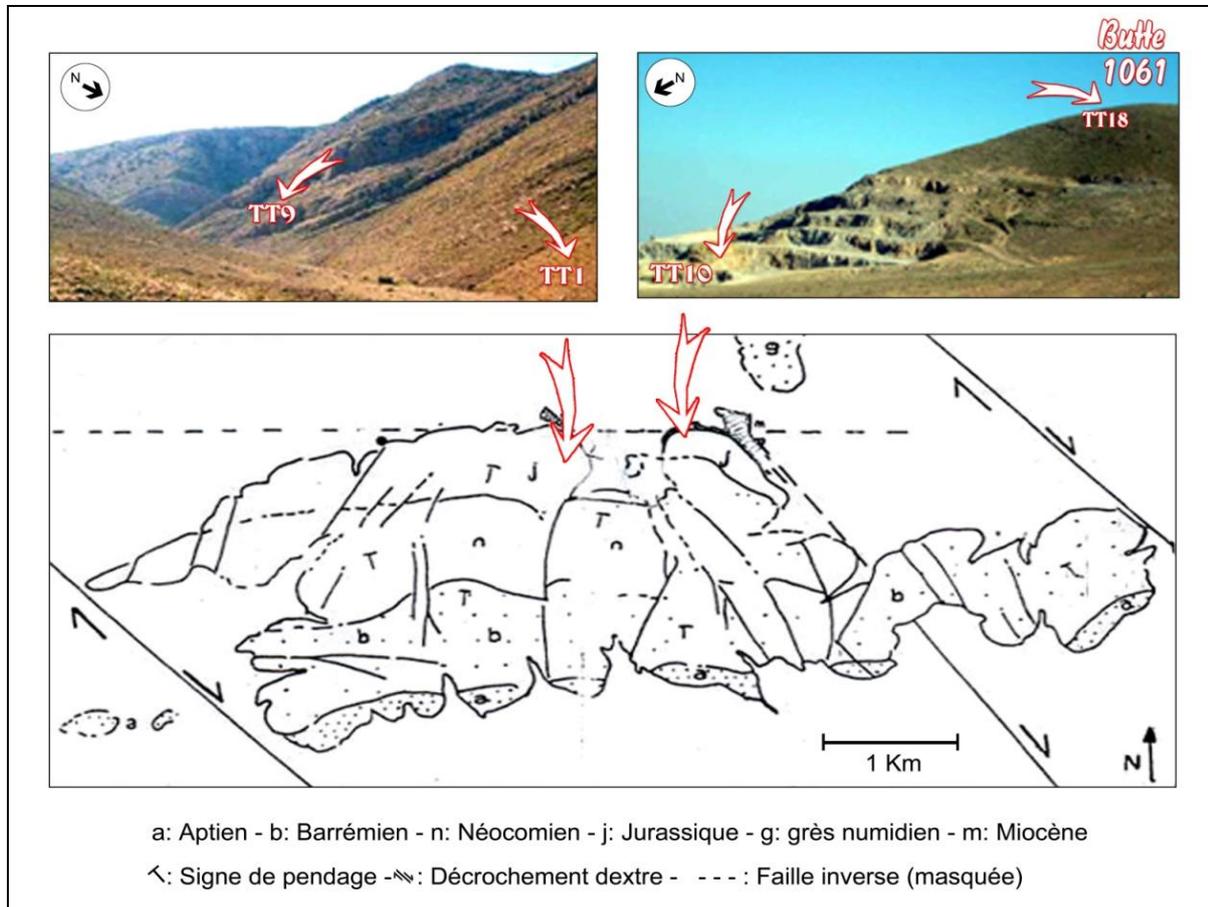


Fig.8.23- **Montage** montrant esquisse structurale du massif de Téioualt agrandie (in Schroeder et al. 1975) et photos des deux sites (carrière et Kef El Ahmar à gauche).

### 8.3.2.3. Résultats des recherches antérieures

Ainsi, pour la carrière actuelle *plus de huit millions de tonnes* de réserves géologiques en dolomie ont été estimées (méthode des profils) et *2,5 millions de tonnes en catégorie C1* ou prouvées (Sonarem, 1976-77). A la cadence de prélèvement adoptée à ce jour, il reste encore en place des réserves appréciables auxquelles il est possible d'ajouter les potentialités à confirmer du massif voisin de Kef El Ahmar (Fig. VIII.23).

#### ❖ Essais et analyses chimiques (1976-77)

- Essais physiques :

Ces essais sont réalisés à partir 09 échantillons, prélevés d'intervalles ciblés de 05 sondages, le mode opératoire n'est pas indiqué. Les résultats figurent dans le tableau 8.24 (Sonarem, 1976-77).

	Poids spécif.(g/cm <sup>3</sup> )	Masse Vol.(kg/m <sup>3</sup> )	Porosité (%)	Absorption d'eau (%)
Valeurs	2.86 à 2.95	25.90 à 2776	3.61 à 10.69	0.40 à 1.12
Moyenne	2.89	2696	6.80	0.72

Tab.8.24- Paramètres physiques, dolomies de Télioualt (Sonarem).

- Analyses chimiques

Les analyses chimiques sont effectuées sur de nombreux échantillons prélevés à partir de saignées, tranchées de surface et de 09 sondages profonds de 33 à 90m...Elles ont donné les résultats suivants: (Tableau 8.25):

Groupe d'échantillons	Groupe 1 : N= 200 Groupe2 : N=58 Groupe 3 : N = 28 (Sondage n°8)										
	CaO	MgO	SiO <sub>2</sub>	R <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P.A.F	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
<b>Min %</b>	29,19	19,6	0,02	0,01	44,65	<0,04	<0,23	0,01	0,05	<0,05	<0,07
<b>Max %</b>	31,91	21,86	2,74	2,50	47,72	<b>&lt;0,04</b>	<b>&lt;0,23</b>	<b>0,30</b>	<b>0,55</b>	<b>&lt;0,05</b>	<b>&lt;0,07</b>
<b>Moy %</b>	<b>30,87</b>	<b>21,13</b>	<b>0,36</b>	<b>0,60</b>	<b>46,64</b>	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a

$R_2O_3 = Fe_2O_3 + Al_2O_3$  - N : nombre d'échantillons - (n.a = non applicable).

Tab.8.25 - Analyses chimiques, campagne de prospection 1976-77 (Sonarem).

Avec des teneurs optimales en MgO et CaO (respectivement 21.13% et 30,87% en moyenne) et des teneurs en éléments indésirables : qui restent acceptables (maximas en SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>...), la dolomie de Télioualt est de composition presque idéale. Sa pureté élevée en fait d'elle un produit propice à de nombreuses applications...

## 3<sup>ème</sup> PARTIE

## CHAPITRE 9 MISE EN ŒUVRE

Pour chacun des sites retenus, des prélèvements d'échantillons sont effectués selon les contextes géologiques et miniers respectifs. L'observation, des essais et analyses ont permis de formuler différentes caractérisations physico-chimiques, notamment en rapport avec les aptitudes de ces matériaux à produire de la chaux.

Prenons l'ensemble des carrières depuis celles des massifs du Safia jusqu'à celles de la région constantinoise.

### 9.1. Cas de la carrière de DJENDEL (Oued N'Khal, Arcelor-Mittal).

#### 9.1.1. Etat de la carrière en 2011

Les gradins de la carrière, hauts de 10 à 12 m et situés au sommet de la topographie, sont ouverts dans la partie nord du site. Ils progressent vers l'est et le N.E et sont à plus de deux km de la station de concassage (Photo 9.1 et carte 9.2).

Ils montrent parfois des bancs de stratifications d'inégales épaisseurs (pluri dm à infra-métriques). Ces bancs amorcent, de part et d'autre des niveaux d'exploitation, les courbures de la charnière de l'anticlinal du massif et prennent sa forme, avec une pente de 5 à 15° vers le SE.



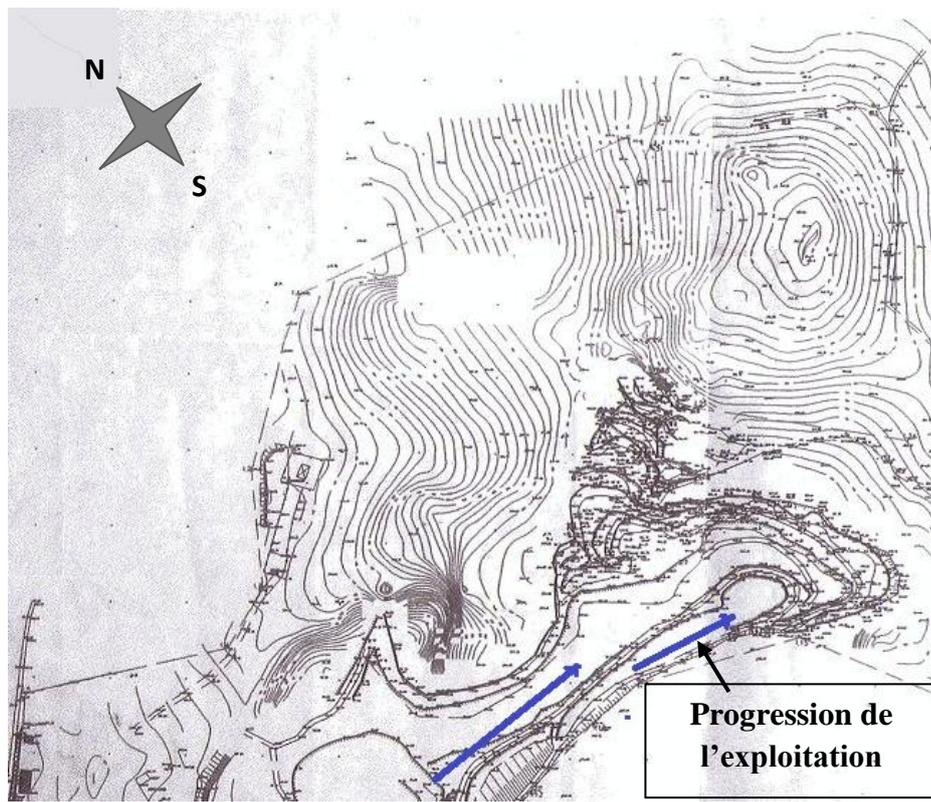
**Photo 9.1** : vue aérienne de la partie en exploitation de la carrière de Djendel (Google).

Ces bancs, faillés, décalés voire déboîtés, perdent souvent leur stratification, ce qui rend difficile leur suivi sur de grandes distances. A ce niveau d'exploitation les directions de fracturation sont difficiles à déceler.

*A l'affleurement, les argiles de couverture sont brunes mais surtout rougeâtres. Elles pénètrent profondément dans les fentes de dissolution et fractures ouvertes dans le calcaire et l'imprègnent fortement.*

La carrière a fourni, ces dernières années, une moyenne de *100 000 tonnes* de tout venant dont près de 80% en castine pour la sidérurgie.

Vers le nord, des accès sillonnent la colline qui surplombe le chantier actuel. Cette colline n'est pas encore exploitée. Son calcaire est très prometteur, car de qualité comparable à celui qui est produit aujourd'hui (l'analyse effectuée par nos soins sur quelques échantillons prélevés à ce niveau donne des résultats très encourageants).



**Fig.9.2 : DJENDEL** partie de la carte topographique  $\approx 1/\text{Filfila } 1/25000$  (→ progression de l'exploitation)

### 9.1.2. Echantillonnage et examen des échantillons

Le prélèvement d'échantillons a été réalisé autant que possible perpendiculairement à la stratification- pas toujours nette- en descendant à partir des niveaux 319 (niveau du plus haut gradin, à l'est sur la figure IX.2) puis des niveaux 305 et 295, sur une séquence d'environ 35m. Les échantillons sont des composites, ils sont regroupés en lots portant les numéros D7 à D-15. Les deux derniers sont pris en descendant le long de la piste d'accès ; quelques dizaines de mètres de distance séparent leurs lieux de prélèvement. Les échantillons D3, D5 et D6 sont des composites provenant du stock de castine prélevés au niveau de l'unité chaux du complexe sidérurgique d'El Hadjar; de même, D16 à D18 proviennent des fractions grossières (castine) de la station de concassage de Djendel et destinées à l'unité précédente.

Ces calcaires sont durs, compacts, massifs, homogènes, finement cristallins à micro cristallins; leurs teintes sont variables mais claires, délavées, allant du gris, au beige, au rosâtre, au bleuté avec toutes sortes de nuances intermédiaires. Parfois un liséré plus foncé, diffus, les parcourt. Ils ont un aspect fusionné, d'où l'appellation de calcaires « marmoréens ». De plus, ils sont souvent traversés par des failles et diaclases assez rectilignes, parfois entrecroisées, imprégnées d'oxydes rouille. Les fractures sont parfois tapissées de cristaux blancs de calcite à surfaces spathiques. Il y a rarement présence de dendrites de manganèse sur les surfaces des échantillons.

L'observation microscopique de quelques lames taillées dans ce matériau ne montre le plus souvent qu'une masse à l'aspect de pâte fusionnée. Aucun fossile intact ou en débris n'a pu être observé dans les préparations. La cassure est esquilleuse et le débit prismatique.

De tels caractères se retrouvent dans tous les carbonates exploités du djebel Safia, influencés sans doute par le métamorphisme ayant affecté le massif voisin du Filfila.

NB : Les exploitants locaux des carrières du Safia assimilent un tel calcaire à du marbre.

### 9.1.3. Résultats des analyses et traitement statistique

Les analyses chimiques des échantillons sont effectuées en Belgique, au laboratoire central de l'entreprise LHOIST.

a)- Analyses chimiques : Les résultats sont consignés dans le tableau suivant (tab. 9. 3).

Station	CaO (%)	MgO (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	S (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	MnO (%)	BaO (%)	SrO (%)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	K <sub>2</sub> O (%)	PF (%)	Zn (ppm)
D3	55,44	0,25	0,07	0,001	0,15	0,06	0,0069	/	/	0,01	/	/	43,83	/
D5	55,52	0,24	0,04	0,001	0,08	0,03	0,0048	/	/	0,01	/	/	43,89	/
D6	55,29	0,38	0,05	0,001	0,15	0,06	0,0042	/	/	0,01	/	/	43,86	/
D7	55,53	0,23	0,04	0,001	0,09	0,02	0,0086	/	/	0,01	/	/	43,89	/
D8	55,6	0,19	0,02	0,001	0,07	0,02	0,0033	/	/	0,01	/	/	43,9	/
D9	55,61	0,19	0,02	0,001	0,06	0,02	0,0034	/	/	0,01	/	/	43,9	/
D10	55,6	0,17	0,03	0,001	0,09	0,03	0,0046	/	/	0,01	/	/	43,88	/
D11	55,58	0,21	0,04	0,001	0,05	0,01	0,0049	/	/	0,01	/	/	43,9	/
D12	55,66	0,15	0,03	0,001	0,06	0,01	0,004	/	/	0,01	/	/	43,89	/
D13	55,56	0,23	0,03	0,001	0,06	0,02	0,0046	/	/	0,01	/	/	43,9	/
D14	55,19	0,38	0,08	0,001	0,24	0,12	0,0143	/	/	0,01	/	/	43,78	/
D15	55,34	0,39	0,05	0,001	0,08	0,03	0,0097	/	/	0,01	/	/	43,91	/
D16	55,53	0,23	0,03	0,001	0,09	0,04	0,0039	/	0,0119	0,01	0,0003	0,0017	43,88	/
D17	55,28	0,26	0,08	0,001	0,32	0,14	0,0051	/	/	0,02	/	/	43,72	/
D18	55,27	0,29	0,08	0,001	0,28	0,14	0,0052	/	/	0,01	/	/	43,74	/
Moyenne	55,47	0,25	0,05	0,001	0,12	0,05	0,0058	/	0,0119	0,01	0,0003	0,0017	43,86	/
Ecart type	0,15	0,08	0,02	0,000	0,09	0,05	0,0030	/	/	0,00	/	/	0,06	/
Coefficient de variation	0,27	30,20	47,06	0,000	69,66	91,65	50,9062	/	/	24,21	/	/	0,14	/
Minimum	55,19	0,15	0,02	0,001	0,05	0,01	0,0033	/	0,0119	0,01	0,0003	0,0017	43,72	/
Maximum	55,66	0,39	0,08	0,001	0,32	0,14	0,0143	/	0,0119	0,02	0,0003	0,0017	43,91	/

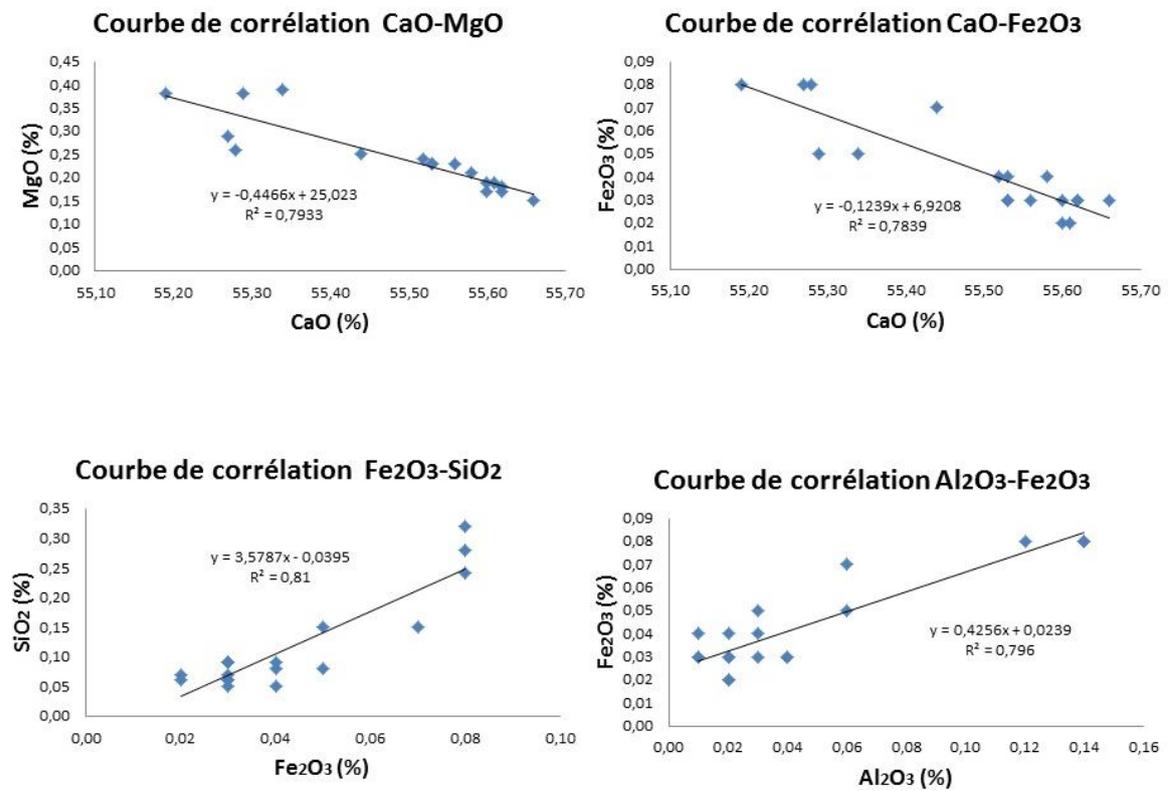
Tableau 9.3- Analyses chimiques des échantillons de Djendel (Lhoist 2009).

### b)-Traitement des données, interprétation

Ces résultats montrent la grande régularité des teneurs qui sont élevées pour CaO et basses pour les autres composants. L'homogénéité de ces calcaires, leur bonne cohésion et leur dureté élevée en font a priori une excellente pierre à chaux.

Le nombre réduit d'observations limite le traitement statistique. Seuls quelques graphes (Logiciel Excel) montrent des corrélations (ou tendances corrélatives) parmi les plus significatives entre les différents composants de ces calcaires.

Les graphes (Fig.9.4) montrent quelques unes des relations binaires ou corrélations les plus significatives révélées parmi les oxydes majeurs de ces calcaires.



**Fig.9.4** – Tendances corrélatives d'éléments composant le calcaire de Djendel.

L'homogénéité de ces calcaires, leur bonne cohésion et leur dureté élevée en font a priori une excellente pierre à chaux.

## 9.2. Applications aux calcaires de Ben Azzouz (Si Messaoud)

### 9.2.1. Etat de la carrière en 2011 (Photo IX.5 ; IX.6)

La carrière dont l'axe est orienté N.O-S.E a surtout progressé vers l'ouest où un couloir d'accès a été ouvert pour entamer de nouveaux affleurements calcaires. A l'avenir, la partie utile de la carrière évoluera surtout vers le S.O. D'importants volumes de terrains argileux et schisteux affleurants y ont été dégagés. Les parties N.E et S.E de la carrière ont servi à accueillir ces déblais qui prennent des couleurs « rouille » en raison de l'abondante présence d'oxydes de fer.

Ces dégagements ont permis de constater l'importance de la fracturation: surtout la faille de direction N.O - S.E, passant légèrement au nord et au milieu de l'axe de la carrière avec un rejet vertical de plusieurs dizaines de mètres et un décrochement de moindre importance vers le S.O (Photo 9.5a). Parfois des zones de broyage sont visibles. (Photo 9.5b).

Les parties dégagées (au N.O et au S.O) contiennent le même calcaire : cristallin, massif, compact, dur, aux couleurs délavées....

Une nouvelle estimation provisoire porte les réserves exploitables à environ 50 millions de tonnes de calcaire (estimation provisoire de l'exploitant).



**Photo-IX.5a**-Vue vers l'*OSO* avec situation du couloir de faille



**Photo IX.5b** - Carrière de Ben Azzouz, vue vers le SSO



**Photo 9.6**- Ben Azzouz, vue vers le NNO (Année-2012).

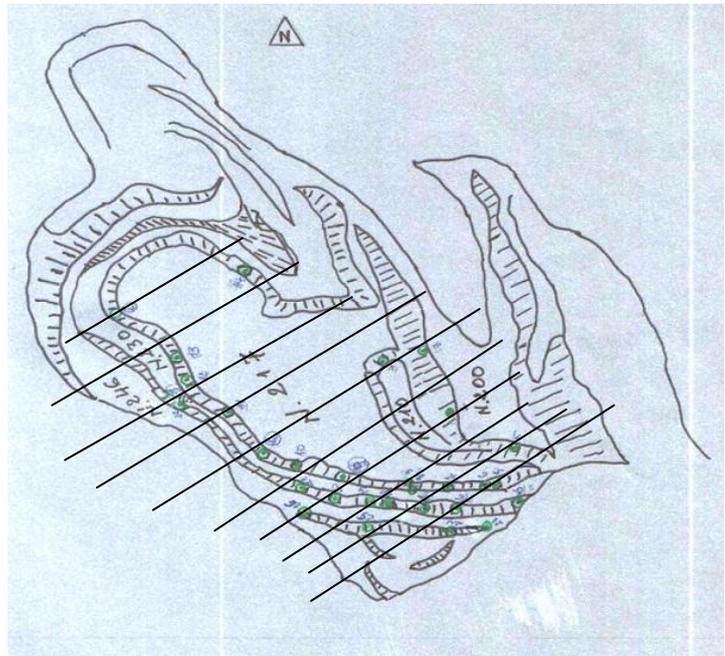
Remarque : La progression actuelle de la carrière s'oriente vers l'ouest..

### 9.2.2. Echantillonnage et description des échantillons :

#### a-) Echantillonnage :

Il a été mené du bas vers le haut, sur la façade exploitée de la carrière (flanc Ouest), perpendiculairement à la stratification pour autant que cette dernière était visible et que les accès aux différents gradins le permettaient. L'absence de repères a nécessité des déplacements latéraux avec prélèvements d'échantillons le long de chacun des niveaux. Ceci, pour couvrir la variabilité des faciès due aux changements de teintes dans les calcaires et à la présence assez fréquente de fractures et diaclases. 35 échantillons ont été collectés au départ, des regroupements ont été opérés par la suite. Les échantillons situés approximativement sur la même transversale, recoupant la stratification et présentant une similitude de faciès, constatée de visu, ont été réunis dans un même lot. Cette logique de regroupement suit des axes plus ou moins parallèles comme indiqué sur le croquis (Fig. 9.7) Le nombre d'échantillons a été réduit de la sorte à **23**.

*Fig. 9.7 : Carrière de BEN-AZZOUZ -Esquisse topographique (Ech.  $\approx 1/5000$ ) avec emplacement des échantillons dont le prélèvement a lieu du NE vers le SO et du bas vers le haut à peu près à la verticale de la stratification, Comme indiqué par le tracé.*



#### -b-) Description des échantillons

D'une manière générale le calcaire est micro cristallin à cristallin, saccharoïde, marmorisé, passant progressivement du gris plus ou moins clair au beige ou encore au rose et parfois au bleuté. Le tout, dans des tons délavés. Dans certaines variétés ces mêmes teintes sont réparties en lisérés et rubans. Il est dur et compact. A la cassure il prend souvent un débit prismatique ; ses fractures, ressoudées ou non sont imprégnées d'oxydes de teinte rouille et contiennent parfois des plaquages oxydés, bruns difficiles à détacher, à l'identique des encroûtements oxydés superficiels. Rarement, certains fragments montrent des dendrites de manganèse.

***IX. 2-3)- Résultats des analyses, interprétation*****a)- Tableau des données chimiques (Tab. 9.8)**

Sample alias	Station	CaO (%)	MgO (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	S (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	MnO (%)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	PF (%)
BA001	BA001	55,32	0,35	0,05	0,001	0,15	0,07	0,0041	/	43,85
BA026	1	55,31	0,32	0,06	0,002	0,17	0,06	0,006	0,03	43,73
BA027	2	55,36	0,4	0,03	0,001	0,06	0,02	0,0047	0,01	43,85
BA028	3	54,76	0,85	0,07	0,003	0,09	0,02	0,0051	0,02	43,88
BA029	4	54,41	0,89	0,12	0,001	0,53	0,1	0,0068	0,01	43,65
BA030	5	55,18	0,51	0,05	0,002	0,11	0,04	0,007	0,01	43,83
BA031	6	55,52	0,22	0,07	0,001	0,11	0,02	0,0057	0,01	43,78
BA032	7	55,09	0,62	0,04	0,003	0,07	0,02	0,0046	0,01	43,88
BA033	8	55,73	0,1	0,06	0,001	0,04	0,07	0,0062	0,01	43,77
BA034	9	55,21	0,33	0,09	0,002	0,32	0,1	0,0077	0,01	43,67
BA035	G	52,11	2,95	0,22	0,002	0,19	0,09	0,0133	0,03	44,09
BA036	10	55,26	0,48	0,04	0,002	0,05	0,02	0,0028	0,01	43,87
BA037	H	49,99	4,87	0,17	0,001	0,1	0,05	0,0101	0,01	44,52
BA038	11	55,55	0,21	0,05	0,001	0,09	0,02	0,0034	0,01	43,8
BA039	12	55,56	0,21	0,04	0,002	0,07	0,03	0,0044	0,01	43,81
BA040	13	55,42	0,36	0,04	0,001	0,04	0,01	0,0057	0,01	43,86
BA041	I	53,5	1,75	0,19	0,001	0,25	0,09	0,0098	0,03	43,87
BA042	14	55,67	0,13	0,05	0,001	0,05	0,02	0,006	0,01	43,8
BA021	15-J-17-18	55,29	0,41	0,05	0,002	0,13	0,03	0,0052	0,01	43,89
BA022	16-19-22	55,6	0,14	0,05	0,001	0,12	0,05	0,006	0,01	43,84
BA023	15-16-20-21	54,09	1,33	0,1	0,002	0,21	0,1	0,006	0,01	43,96
BA024	46/23	55,36	0,39	0,04	0,001	0,07	0,01	0,0042	0,01	43,93
BA025	46/24-25-26	52,73	2,27	0,16	0,001	0,63	0,09	0,008	0,07	43,92
Moyenne		54,70	0,87	0,08	0,002	0,16	0,05	0,0062	0,02	43,87
Ecart type		1,40	1,14	0,05	0,001	0,15	0,03	0,0024	0,01	0,17
Coefficient de variation		2,56	130,0	68,05	43,72	95,3	66,64	38,207	88,1	0,39
Minimum		49,99	0,10	0,03	0,001	0,04	0,01	0,0028	0,01	43,65
Maximum		55,73	4,87	0,22	0,003	0,63	0,10	0,0133	0,07	44,52

**Tab. 9.8-** Données d'analyses chimiques, Ben Azzouz- (Analyses Lhoist- 2007-2009)

NB : les échantillons BA021 à BA025 sont des composites (2 à 4 fragments, prélevés chaque fois autour d'un point central ou situés sur la même verticale).

b)- *Interprétation*

Ces analyses montrent la relative régularité de composition de ce calcaire où quelques échantillons issus des niveaux moyens (BA 037 ; BA 041) ou des composites issus des niveaux inférieurs (BA 023 et BA 025) montrent une présence légèrement prononcée de magnésium, lequel est probablement issu d'échanges au niveau de la transition entre calcaires et dolomies sous jacentes ou encore grâce à l'activité tectonique ayant affecté ce secteur. La présence de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  n'est pas significative ; de même, les proportions de S, MnO et  $\text{P}_2\text{O}_5$  reste très basse ou même à l'état de traces. Ceci prouve la pureté élevée de ce calcaire. Des corrélations établies (Logiciel Excell) entre les principaux oxydes de ce calcaire font ressortir la nette incompatibilité de comportement entre le CaO et le MgO composant ce calcaire (Fig. 9.9).

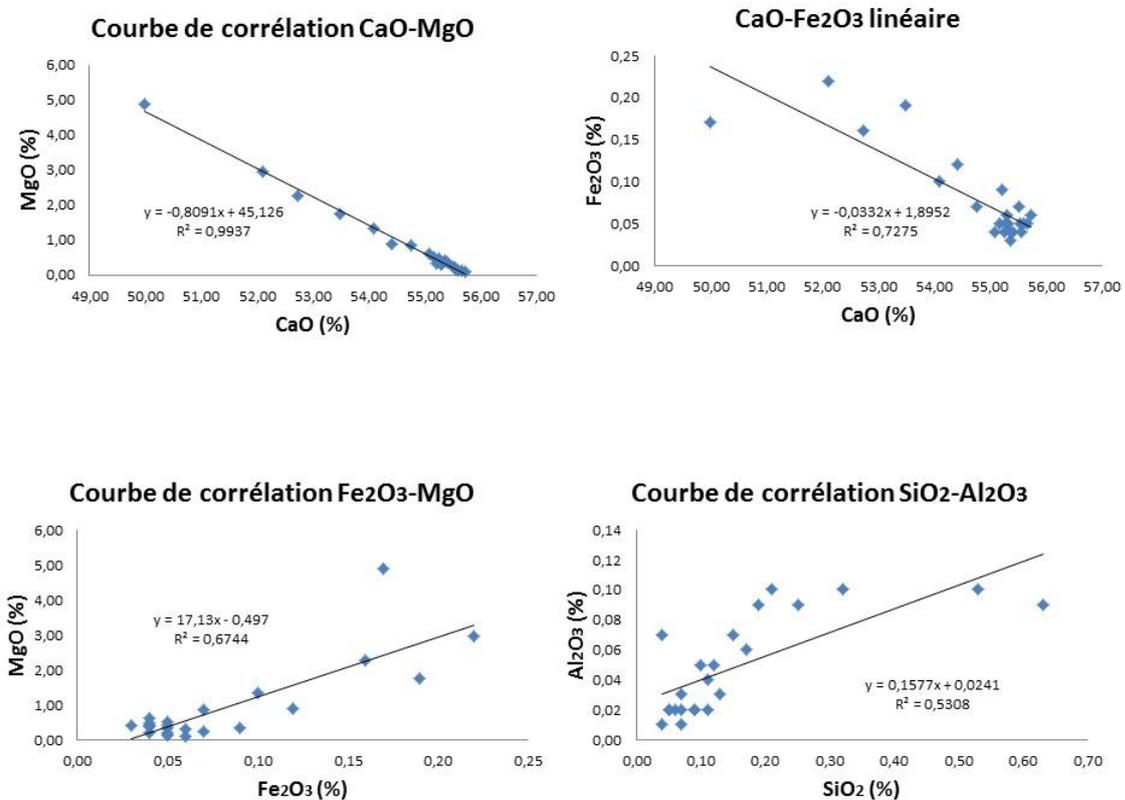


Fig.9.9- Graphes de corrélations des principaux oxydes (valeurs arithmétiques) du calcaire de Ben Azzouz.

Les autres graphes font ressortir des tendances corrélatives analogues à celles rencontrées à Djendel, notamment les incompatibilités CaO/MgO et CaO/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Si une campagne de prospection complémentaire est retenue pour l'avenir, il serait intéressant d'accéder aux niveaux dolomitiques sous jacents, signalés par de nombreux auteurs (Raoult, Vila et prospecteurs de SONAREM). La diminution significative des teneurs de **CaO** en faveur de celles de **MgO** rendrait valorisables de telles dolomies.

### 9.3. Carrière de calcaire de l'Oum Settas- (El Khroub- Constantine, ENG)

#### 9.3.1. Etat de la carrière au moment de l'échantillonnage (2007)

La partie exploitée du terrain a débute à la limite *Sud Est* du massif, presque à hauteur d'un petit Oued à sec une bonne partie de l'année, juste au dessus du niveau où affleure le « hard ground » qui sépare à cet endroit les formations cénomaniennes de celles du Sénonien qui les surmontent.

Le niveau 735 est le niveau de base de l'exploitation. Celle-ci s'est dirigée vers le *NE*, en montant dans la topographie, puis vers le *NO* actuellement.

Les gradins d'exploitation, d'environ 15 m de hauteur, sont constitués d'un calcaire clair, blanchâtre vers sa base mais progressivement teinté par les oxydes de fer brun rougeâtre au fur et à mesure que l'on monte vers les terrains naturels, recouverts de sols où poussent une végétation clairsemée.

Ce calcaire ne montre pas de stratification apparente, du moins dans cette partie du massif. Le pendage y est faible : 15° à 20° vers le Sud mesuré à hauteur de la surface durcie. La roche est massive, dure et assez fortement diaclasée, fissurée dans tous les sens. Il est difficile de reconnaître les directions dominantes de fracturation sans doute masquées par les nombreuses contraintes subies par le massif durant son passé géologique ou, plus récemment sous l'effet des tirs d'explosifs liés à l'exploitation.

Qu'elles soient anciennes ou nouvelles, ces fractures d'extension variable, sont à l'origine de :

- Phénomènes de recristallisation, affectant celles qui sont les plus étendues. On observe des rangées de cristaux de calcite de tailles pluri millimétriques à pluri centimétriques. Ces cristaux croissent perpendiculairement aux parois de l'ouverture et montrent un aspect rubané de couleur miel tantôt clair, tantôt foncé.

- Des dissolutions ayant provoqué l'élargissement des fentes, leurs approfondissements et la création de poches karstiques de tailles très variables. Ces poches sont souvent remplies de matériau marron-rougeâtre, friable, argileux. L'analyse par diffraction des RX d'un tel matériau, prélevé d'une poche superficielle, a confirmé la présence de calcite, d'hématite et de phases non identifiées. La coloration en question peut pénétrer profondément dans le calcaire sans doute à cause de la présence conjuguée des fissures et du fait de la porosité.

La teinte est plus foncée dans les joints stylolitiques, de faible extension, affectant quelquefois la roche calcaire.

A l'affleurement, le calcaire est parcouru par des chenaux de dissolutions à contours irréguliers. Il porte aussi de nombreuses perforations plus ou moins arrondies millimétriques à pluri centimétriques...

#### 9.3.2. Echantillonnage, examen des échantillons

En tout, six itinéraires de prélèvements ont été suivis : (Traces en pointillés blanc sur photo Google - Photo 9.10)



Fig. 9.10- Vue panoramique du site de l’Oum Settas (Ph.Google-2009) avec traces des profils d’échantillonnage (1, 2, 3, A, B).

- ◆ Quatre partent à la base de la plateforme de la carrière (niveau 735). Ils se dirigent à quelques écarts près du Sud vers le Nord, montant dans la topographie et traversant la stratification en sens inverse des dépôts. (Echantillonnage de reconnaissance et Profils 1, 2 et 3).
- ◆ Deux autres sont situés plus au nord. Ils sont plus ou moins parallèles et dirigés du Nord-Est vers le *Sud-Ouest*, dans le sens ascendant de la stratification et assez perpendiculairement à celle-ci. (Coupes A et B).

Parmi les quatre prélèvements de départ:

a) le premier est un échantillonnage de reconnaissance, réalisé en parcourant les différents gradins. Il a permis de collecter des fragments dits de reconnaissance (minéralogiques, paléontologiques...) qui montrent la variabilité des faciès rencontrés. Entre les niveaux 765 et 780m, près des profils 1 et 2, se trouve un banc métrique montrant un calcaire clair, blanchâtre riche en fossiles entiers et en débris parmi lesquels des rudistes de type hippurites datant la fin du Crétacé (Photo 9.11).



**Photo 9.11-** Hippurites, fragments de rudistes et autres débris de fossiles de la fin du Crétacé, prélevés à hauteur des niveaux 765 et 795, près des profils I, II et III.

Les autres échantillons collectés sont: *AG 1*, *AG 2*, *AG 3*, *AG 4*, *AG 5* et *AG 33* (Analyses chimiques en annexe).

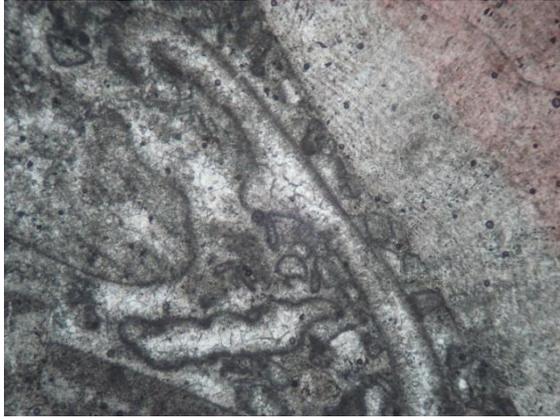
Par ailleurs, des préparations microscopiques ont été réalisées sur quelques échantillons provenant du *prélèvement de reconnaissance*. Leurs observations en lumière naturelle a permis de reconnaître deux types de microfaciès :

- Des *Grainstones* à *Packstones* à lamellibranches (Fig.-9-12 et (Fig.9.13), les débris les plus abondants sont ceux des *rudistes* et *inocérames* associés à des débris d'*échinodermes*, de *gastéropodes* et à des pellets (Fig.9.14). Parfois de fréquentes *orbitolines* s'associent à ce microfaciès (Fig.9.15). L'ensemble des organismes est micritisé, certains ont subi des dissolutions puis ont été recristallisés par de la calcite granulaire. Des débris d'organismes sont perforés et montrent un degré d'usure avancé. Le grainstone présente le plus souvent une cimentation granulaire et parfois une cimentation syntaxiale autour des débris d'organismes.

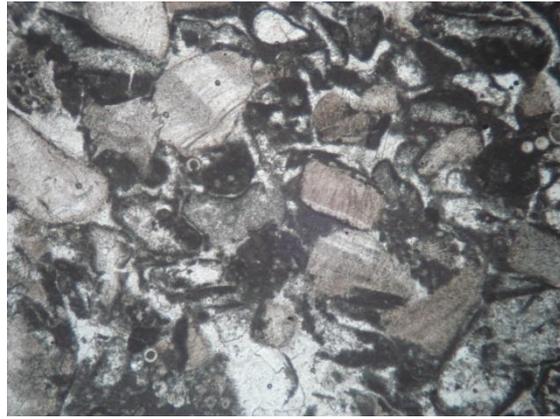
Le milieu de dépôt de ces formations est celui d'une avant barrière avec un niveau marin relativement agité.

- Un *Wackstone* à foraminifères benthiques avec des bisériés, des miliolidés, des ostracodes (Fig.9.16) et parfois des péritoïdes. C'est un microfaciès affecté par d'importants phénomènes de dissolution représentés par une porosité de fracturation et des fenestres à remplissage calcitique granulaire (Fig.9.17).

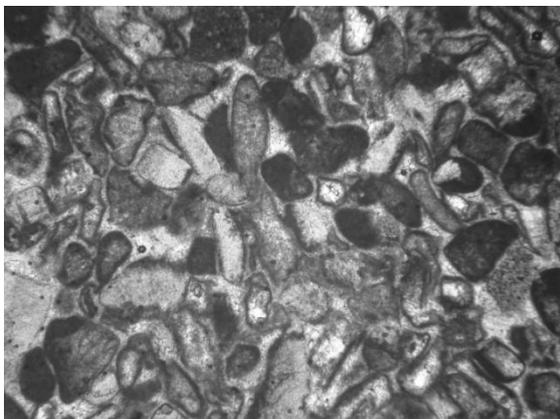
Ce microfaciès représente des dépôts reliés à un paléo-environnement lagunaire supratidal.



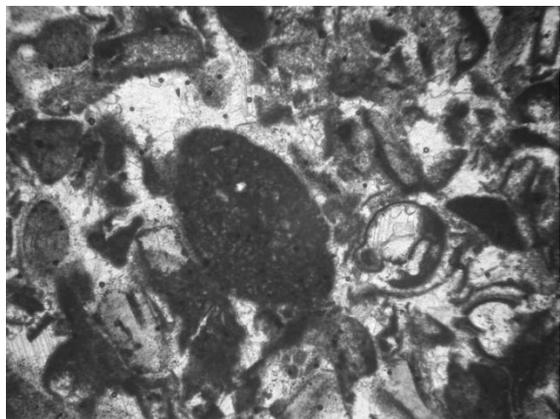
**Fig.9.12-** Grainstone-Packstones à débris de rudistes.



**Fig.9.13-** Grainstone-Packstone à débris de Lamellibranches.



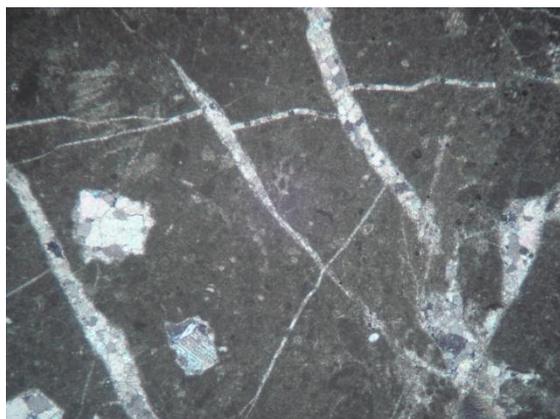
**Fig.9.14-** Grainstone-Packstone à pellets et débris d'Echinodermes et de lamellibranches



**Fig.9.15-** Grainstone-Packstones à orbitolines.



**Fig.9.16:** Wackstone à foraminifères benthiques



**Fig.9.17:** Wackstone à fenestrés remplis de calcite granulaire.

Les préparations microscopiques proviennent des échantillons: *AG 1, AG 2, AG 3, AG 4, AG 5 et AG 33*.

**b)- Le second** échantillonnage a été effectué le long de trois profils (I, II et III) situés côte à côte mais distants- d'ouest en est- d'environ 200m l'un de l'autre:

Schématiquement, en coupe, les profils I, II et III se présentent ci-après (Fig.9.18) :

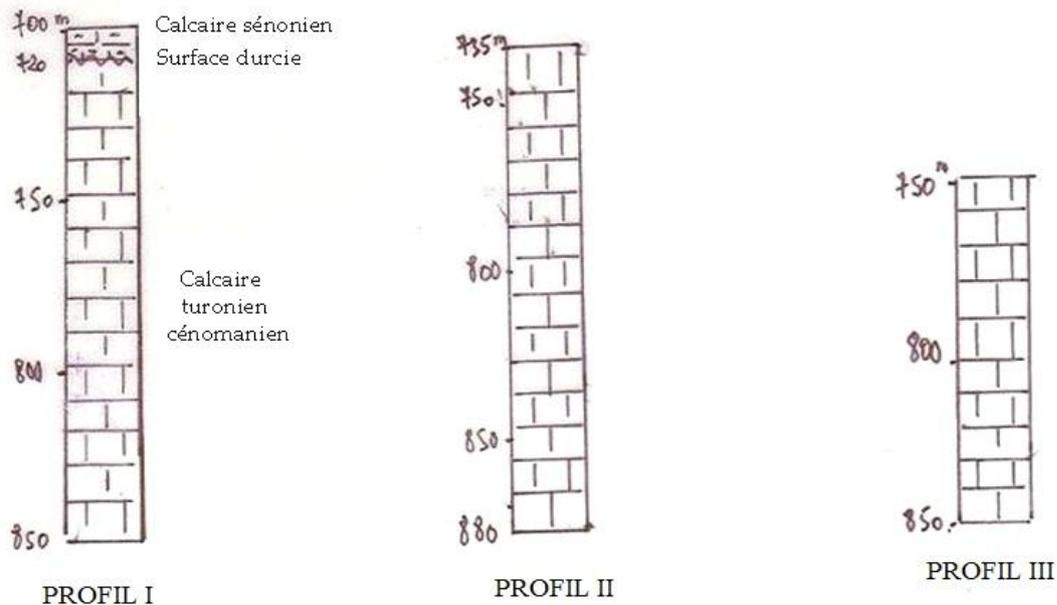


Fig.9.18- Représentation synthétique des profils 1, 2 et 3 ; (Observations personnelles).

Ils sont tous prélevés dans le Cénomano-Turonien indifférencié, les deux premiers profils partent de leur surface de contact avec le Sénonien.

**Du profil I**, sont prélevés les échantillons AG 6 à AG 14.

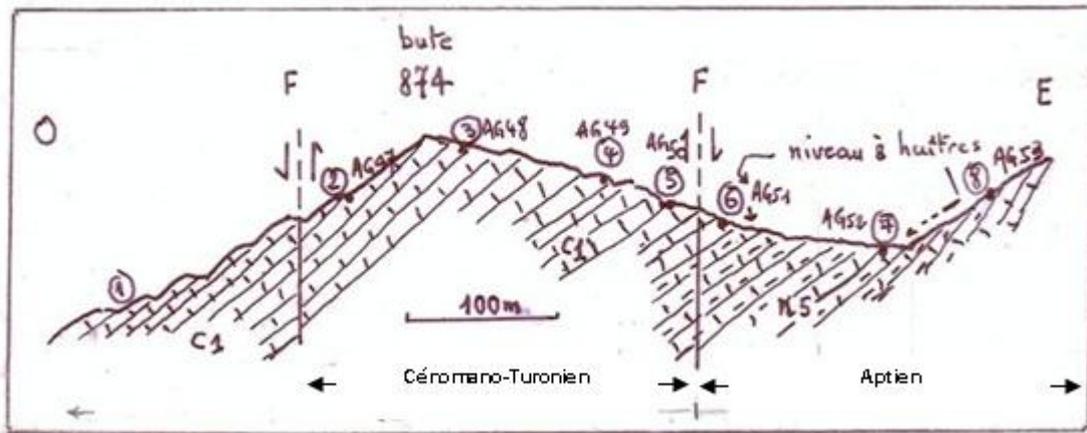
**Du profil II**, sont prélevés les échantillons AG 20 à AG 31.

**Et du profil III**, sont prélevés les échantillons AG 32 à AG 36 (Les analyses chimiques sont données en annexe).

**c)- Le troisième** échantillonnage concerne deux profils plus ou moins parallèles, menés presque perpendiculairement aux précédents et dénommés **A et B**. Les prélèvements sont réalisés d'est en ouest :

➤ La coupe A (ou 4° profil, **figure 9.13**) joint le sommet de l'aptien au cénomano-turonien. Les prélèvements concernent les échantillons AG 47 à AG 53.

Les analyses chimiques de tous ces échantillons figurent dans les tableaux A.2 annexés.



**Fig.9.19** - Lithologie du profil A avec position et numéros des échantillons. [ $c_1$  : Cénomano-Turonien ;  $n_5$  : Aptien] – (Observations personnelles).

➤ la coupe **B** (ou 5° profil) concerne un levé d'échantillons banc par banc. Elle débute dans la formation aptienne et se poursuit dans celle du Cénomano-Turonien, en allant de l'Est vers l'Ouest, perpendiculairement à la stratification. Les échantillons **B1** à **B 59** y ont été prélevés. Chaque échantillon-pris au centre-représente un banc. Leur description (Annexe.A.1) ainsi que leurs contenus chimiques sont donnés dans le tableau A.2.2 annexé.

La formation aptienne montre un calcaire fin, dur, sombre en surface et nettement plus clair à la cassure. Ce calcaire contient des huîtres et fragments d'huîtres de tailles pluri centimétriques. La séquence se poursuit par une zone de transition marquée par des surfaces durcies, des joints stylolitiques, des dépôts ferrugineux... comme il apparaît dans la séquence banc par banc (tab.9.20 et Fig.9.10). Le milieu de dépôt devient plus calme au début du Cénomano-Turonien mais toujours riche en fossiles (huîtres, miliolidés...).

*Dans l'ensemble, les faciès rencontrés attestent d'une sédimentation produite en milieu marin peu profond.*

Par ailleurs, du tableau A.2.2 en annexe (analyse chimique des 60 échantillons prélevés banc par banc), les proportions de  $CaO$ ,  $Fe_2O_3$  et de  $SiO_2$  rapportées au milieu de chacun des bancs et consignées dans le tableau 9.20, ont permis d'établir le graphique (Fig.9.21) montrant l'évolution de ces derniers par rapport à  $CaO$  le long de cette séquence stratigraphique.

Intervalles cumulés	CaO (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)
m			
0	54,29	0,83	0,11
5	54,58	0,68	0,08
5,5	54,25	1,18	0,11
11,5	54,39	0,86	0,12
12	55,03	0,15	0,03
13	54,76	0,53	0,07
15,5	54,68	0,56	0,07
16	54,96	0,24	0,05
16,5	54,89	0,34	0,06
17	55,21	0,14	0,02
18	55,16	0,12	0,05
19,75	54,83	0,34	0,18
20,5	54,6	0,81	0,06
21	53,59	1,77	0,24
21,5	53,55	1,95	0,14
21,75	54	1,35	0,08
22	54,13	1,23	0,07
22,25	53,89	1,64	0,14
23	54,68	0,78	0,18
23,5	55,15	0,16	0,03
23,75	55,23	0,27	0,04
24,25	55,17	0,23	0,04
24,75	54,73	0,53	0,05
25,25	55,19	0,15	0,03
25,75	55,21	0,18	0,03
27,75	55,04	0,2	0,03
29	54,9	0,35	0,05
30	54,38	0,96	0,1
30,75	53,84	1,67	0,18
31,25	53,46	1,95	0,21
31,5	53,26	2,23	0,24
31,75	53,59	1,88	0,19
32,25	54,39	0,87	0,06
32,75	53,98	1,47	0,08
33,5	55,08	0,3	0,03
34	55,01	0,32	0,03
35	55,11	0,13	0,03
35,5	55,19	0,18	0,02
37	54,82	0,42	0,07
37,75	55,33	0,08	0,02
38,75	55,24	0,07	0,02
39,75	55,15	0,11	0,02
40,75	54,87	0,31	0,07
42,25	54,96	0,23	0,03
43,25	55,24	0,08	0,02
43,75	54,8	0,34	0,07
44,25	55,41	0,08	0,02
44,75	55,41	0,14	0,02
45,25	55,24	0,13	0,04
45,75	55,2	0,26	0,04
46,25	55,27	0,17	0,03
47,25	54,6	0,67	0,09
48,25	54,84	0,44	0,05
49,25	54,96	0,35	0,04
50,25	55,46	0,1	0,01
51,25	55,22	0,19	0,02
54,25	55,49	0,13	0,02
55,25	54,93	0,35	0,04
56,75	54,77	0,49	0,06
59,375	55,35	0,17	0,02

Tab.-9.20- Dosages de CaO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et SiO<sub>2</sub> par banc échantillonné (intervalles cumulés).

Le graphique **9.21** montre le comportement contradictoire de  $SiO_2$  (et à un degré moindre, celui de  $Fe_2O_3$ ) par rapport à celui de  $CaO$ . En effet, dès que diminue le pourcentage de ce dernier, augmentent ceux de  $SiO_2$  et de  $Fe_2O_3$ . Autrement dit l'appauvrissement du carbonate se fait à la faveur de phases plus ou moins tardives silicatées et ferrugineuses...

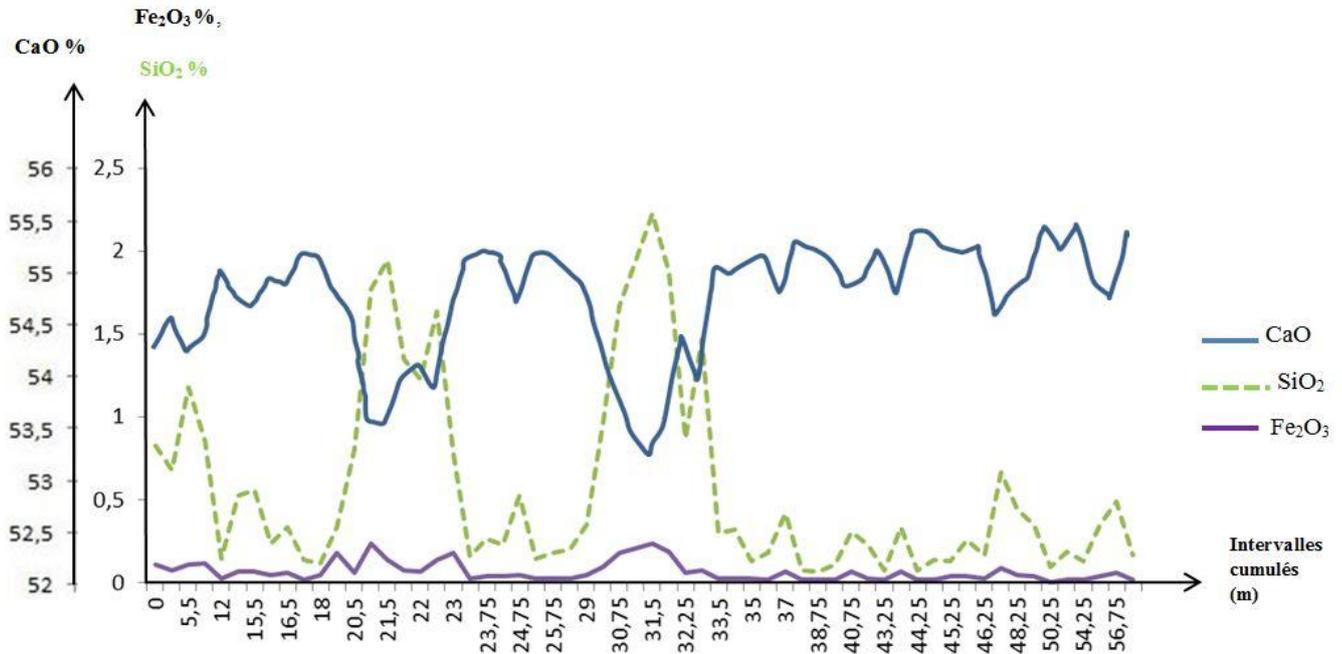


Fig.9.21-Graphique du comportement de  $SiO_2$  et  $Fe_2O_3$  par rapport à  $CaO$  le long du profil banc par banc, (Observations personnelles).

**NB :** Les échantillons AG 37 à AG 39 sont des produits finis, broyés en diverses granularités. Ils proviennent de l'unité carbonates de Calcium et ont fait l'objet d'analyses chimiques insérées avec les autres données concernant ce site.

### 9.3.3. Analyses chimiques, traitement statistique et interprétation

#### a)- Résultats des analyses

Les différents prélèvements réalisés ont permis de collecter quelques **107** échantillons de surface qui ont été analysés pour leur contenu en oxydes majeurs [ $CaO$ ,  $MgO$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $MnO$  et  $S$ , avec PF, (pertes au feu)]. Les données figurent dans le tableau A2.1 annexé.

Parmi ces échantillons, **47** le sont pour **18** éléments (au contenu précédent s'ajoutent  $BaO$ ,  $SrO$ ,  $P_2O_5$ ,  $Na_2O$ ,  $K_2O$ ,  $Pb$ ,  $Zn$ ,  $Ni$ ,  $V$ ,  $TiO_2$ ). Voir tableau d'analyses A2.2 annexé.

Les analyses sont effectuées par voies spectrométriques : d'absorption atomique (**AAS**) ; éventuellement complétées par fluorescence X (**XRF**) et par quantométrie à plasma dans le laboratoire de l'entreprise LHOIST, en Belgique, selon les modes opératoires en usage dans ce laboratoire.

### 9.3.3.1. Traitement des données chimiques

L'approche statistique réalisée au moyen du logiciel Statistica [Version 6], pour une distribution normale des données, permet de relever plusieurs tendances corrélatives. En retenant un taux de corrélation significatif ( $r > 0.83$  ;  $r$  : coefficient de corrélation). Les matrices de corrélation figurent dans les annexes C.1 et C.2.

Quelques unes de ces tendances apparaissent dans les diagrammes binaires des variables (ici les éléments chimiques). Deux cas de figure sont envisagés en fonction du nombre d'observations et de variables :

✓ **Pour le premier cas (107 observations et 08 variables).**

Les corrélations obtenues pour les taux les plus significatifs sont indiqués dans les graphes ci-après : (Fig.9.22)

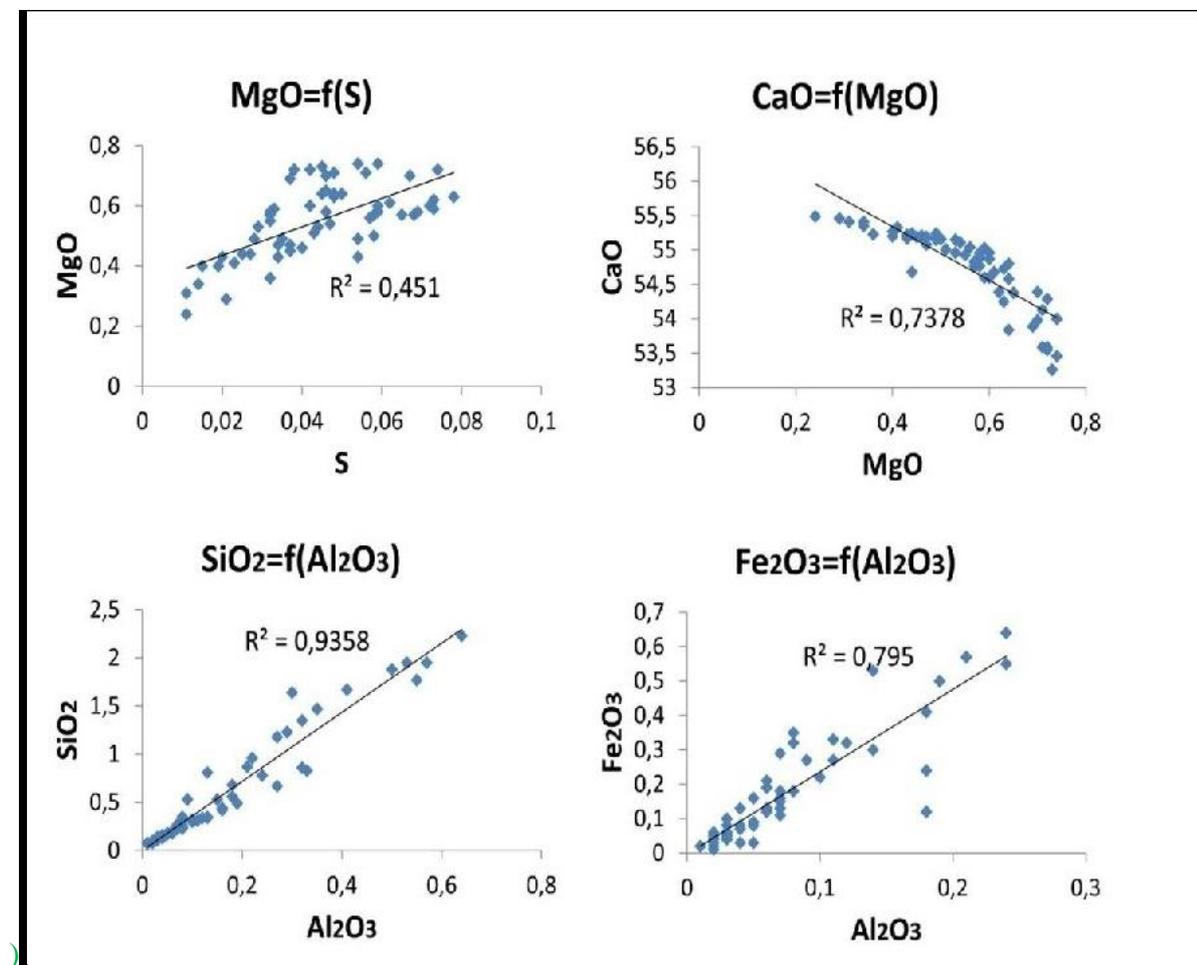
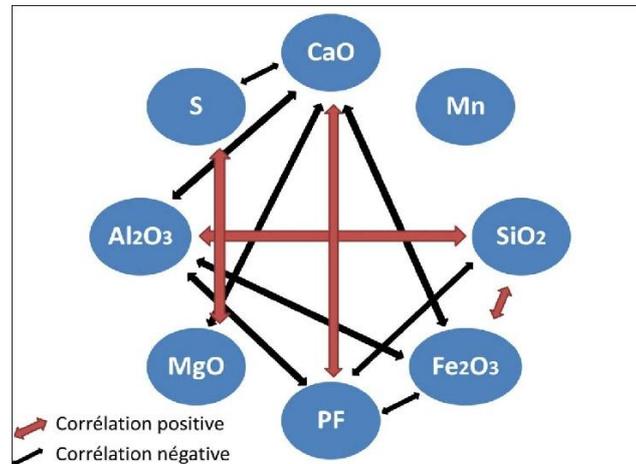


Fig. 9.22- Graphiques des corrélations éléments majeurs (107 observations, 8 variables).

### 9.3.3.2. Interprétations

Notons que les oxydes  $Fe_2O_3$ ,  $Al_2O_3$  et  $SiO_2$ , en proportions mineures dans ces calcaires, révèlent entre eux des comportements convergents, alors que  $CaO$  et  $MgO$  sont à l'opposé très divergents.

La synthèse des corrélations (positives et négatives) et leurs liens respectifs apparaissent dans le graphe (**Fig. 9.23**) ci-après :



**Fig.9.23** - Graphiques de synthèse des corrélations (107 observations, 8 variables).

Remarque : Les variables sont réparties uniformément et de façon arbitraire sur le pourtour du graphe et leurs relations sont marquées par des traits différenciés.

- les **corrélations positives** montrant les affinités (ou compatibilités) suivantes :

(a) - **CaO - PF** liée à la présence de CO<sub>2</sub> dans les calcaires ;

(b) - **Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - SiO<sub>2</sub>** reflète la phase argileuse des sédiments associés aux calcaires ;

(c) - **MgO - S** Affinité du soufre pour l'oxyde de magnésium.

- des **corrélations négatives** montrant des incompatibilités d'associations :

(d) - **S - CaO ; CaO - MgO ; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - CaO.**

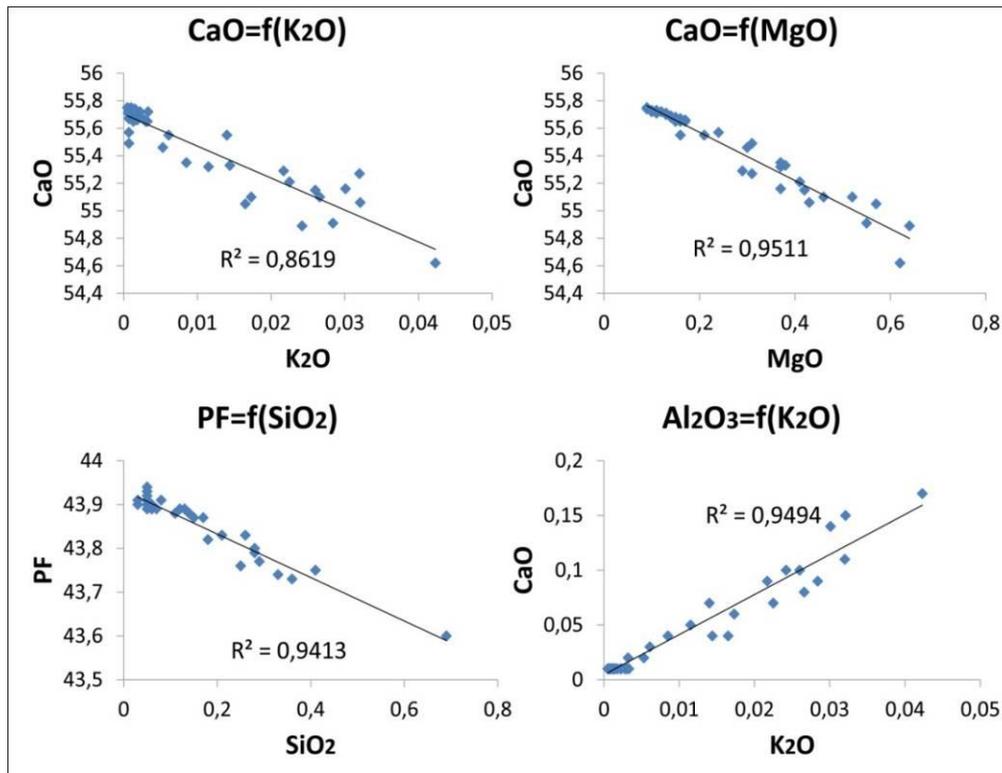
✓ **Pour le deuxième cas (47 observations et 18 variables) :**

(e) – la même tendance corrélative qu'en (b) réapparaît, avec K<sub>2</sub>O et MgO qui rejoignent cette association dans la phase argileuse ;

(f) – Une autre tendance corrélative est celle qui regroupe :

**MnO - P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>** (où r = 0,83).

Mais son interprétation est incertaine en raison du nombre restreint d'observations. La figure 9.24- montre des diagrammes reflétant quelques unes des tendances évoquées.



**Fig. 9.24-** Graphique montrant quelques corrélations (47 observations, 18 variables)-

Cette approche géochimique met en évidence des corrélations entre les éléments contenus dans les calcaires de l'Oum Settas et même certaines incompatibilités. L'examen des données d'analyses montre par ailleurs la très faible présence d'éléments chimiques autre que CaCO<sub>3</sub> et une grande régularité de leurs distributions dans l'espace échantillonné (Tableau des données annexé). La liaison du calcaire avec les argiles et autres impuretés associées est éphémère car facile à rompre durant le broyage.

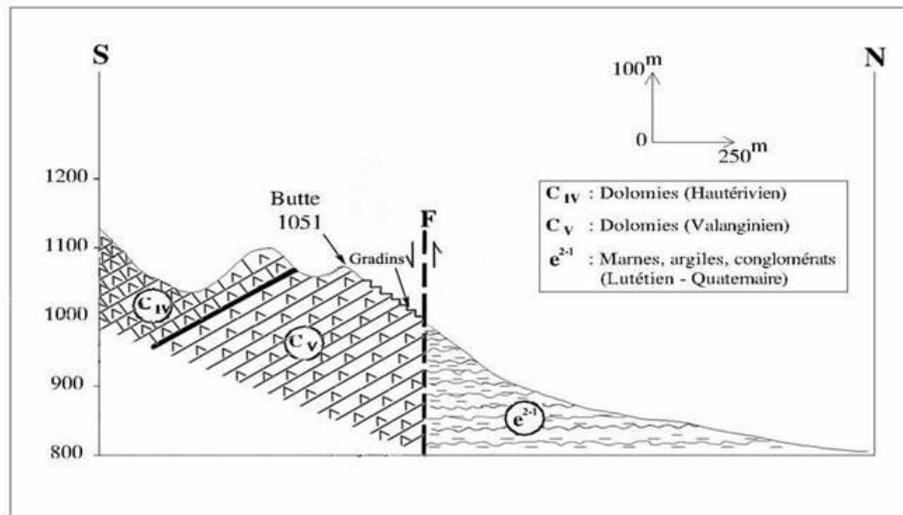
*Cette pauvreté chimique et cette homogénéité de composition font du calcaire de l'Oum Settas un matériau qui fournit un produit (le carbonate de calcium) d'excellente qualité. Si l'on tient compte de la texture de la roche de départ, de sa blancheur et de son bon comportement mécanique à l'écrasement, il y a là une somme des caractères indiquant aussi sa bonne aptitude à produire de la chaux.*

## 9.4. Carrière de dolomie de TEIOUALT

### 9.4.1. Etat de la carrière au moment de l'échantillonnage (2007- 2008)

L'exploitation se fait sous l'égide d'ALGRAN « Algérienne des Granulats » filiale de l'entreprise minière ENOF : « Entreprise des Non Ferreux » et ce, depuis les années 1980. La production actuelle est de moins de 100.000 tonnes par an de granulats dolomitiques tous usages confondus.

La carrière qui est située dans la partie NE du massif, est ouverte entièrement dans les niveaux dolomitiques du Jurassique Supérieur, juste à leur contact avec les formations néogènes. L'exploitation se fait par gradins hauts de 12m chacun et progresse vers le sud depuis le niveau 900m en direction de la butte d'altitude 1061m (Fig.9.25 et photo en haut à droite Fig.9.28). La stratification à ce niveau, quand elle est visible, s'oriente *est-ouest* avec une pente allant de 25° à plus de 30° vers le sud. Elle est parfois marquée par des joints de stratification marno-argileux peu épais.



**Fig. 9. 25** - Coupe schématique N-S : carrière de Téioualt (Observations personnelles).

Les travaux d'exploitation ont traversé des zones à duretés variables associées à des fractures ouvertes et contenant des argiles et des sables dolomitiques à grains plus ou moins fins dont la composition chimique est voisine de celles des dolomies compactes [(SONAREM- 1977).

La plus grande des « fissures » est une vaste poche qui traverse au moins deux gradins. Elle apparaît sous la forme d'un karst rempli de sable ; ce qui pose d'ailleurs quelques problèmes à la stabilité des talus de la carrière. Pour accéder à la roche saine, il faut souvent curer les parties tendres.

Plus rarement, dans les zones karstiques de la carrière, les dolomies apparaissent assez tendres et en boules pluri centimétriques. (**Fig.9.26**)



**Photo 9.26- Dolomie en boules présente dans les poches karstiques, Télioualt.**

Ainsi, au démarrage des travaux d'exploitation, plus de huit millions de tonnes de réserves géologiques en dolomie ont été estimées (méthode des profils) et 2,5 millions de tonnes en catégorie C1 ou prouvées (Sonarem-1976-77). A la cadence de prélèvement adoptée à ce jour, il reste encore en place des réserves appréciables qu'il est possible de valoriser davantage.

La production de dolomie est assez variable ces dernières années et tourne en moyenne autour de 100.000 tonnes par an de granulats dolomitiques tous usages confondus.

#### **9.4.2. Echantillonnage, examen des échantillons et interprétation**

Les dolomies constituant le minerai sont des dolomies grises, d'un gris plus ou moins sombre, à grain plus ou moins fin, assez denses quoique poreuses et dures, montrant une certaine « cavernosité ». Les pores sont souvent de forme ovale, allongés, avec des contours de néoformation.) A la cassure au marteau il se produit quelquefois une étincelle avec dégagement d'une odeur fétide.

Un échantillonnage sommaire, de reconnaissance, a été effectué en 2007 dans la *carrière en activité* et sur le flanc N-E de *Kef-El-Ahmar*, le massif voisin, non exploité, situé à environ 1 km à l'ouest de cette carrière (Flanc Est visible sur la photo en haut à gauche de la figure 9.27), Les échantillons ont été analysés en Belgique durant l'année 2008 dans le laboratoire du groupe LHOIST, par les mêmes méthodes et procédés que ceux déjà utilisés pour les échantillons des autres sites d'étude. Ici, s'ajoutent des analyses thermiques sur des composites que nous évoquerons par la suite.



Fig.9.27 - photos de la carrière et du massif de Kef El Ahmar (Téioualt) indiquant les limites d'échantillonnages.

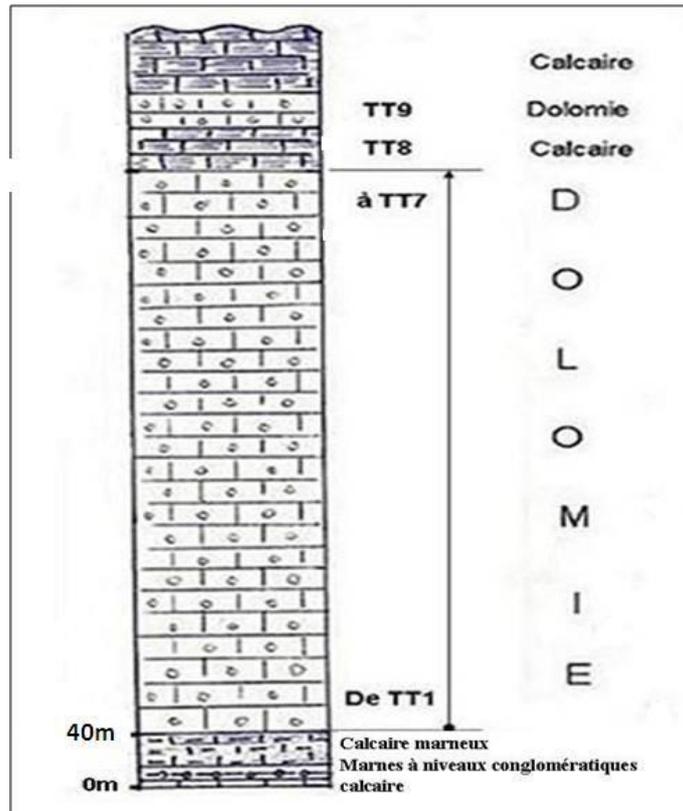
**a) – Au niveau de la carrière**

Une dizaine d'échantillons a été prélevé : (Fig.9.27, photo du haut à droite)

- ❖ 08 échantillons, à peu près au milieu des gradins ouverts et à hauteur d'homme en se dirigeant vers le sud depuis le niveau de base (Altitude 900m) jusqu'au gradin supérieur ; puis plus au sud,
- ❖ 02 échantillons en surface, à 150m d'intervalle au-delà du dernier gradin, en direction de la butte 1061m.

**b)- Au niveau de Kef-El- Ahmar (Fig.9.27, photo à gauche et Fig.9.28)**

Les prélèvements (09 échantillons) ont été effectués le long du flanc NE de ce massif, en remontant, du nord vers le sud, plus ou moins parallèlement au talweg marquant la limite est de ce versant. L'intervalle d'échantillonnage est situé entre TT1 et TT9, comme sommairement indiqué sur la photo (figure 9.27) et Figure 9.28.



[Fig.9.28 Reconstitution lithologique du secteur échantillonné au Kef El Ahmar (Observations personnelles)]

Ces échantillons sont prélevés dans les dolomies surmontant une alternance calcaire/marnes/calcaire. Les marnes renferment des niveaux conglomératiques et les calcaires sont à grains fins et nettement stratifiés avec une direction N 90°E et un pendage de 35°S (cette orientation n'apparaît pas dans les dolomies les surmontant).

Les prélèvements, tout comme ceux de la carrière, sont des composites (sains et éventuellement débarrassés des encroûtements...) pris chacun à environ 2m de rayon autour d'un point central.

❖ 7 échantillons (TT1 à TT7) représentent les dolomies prélevées en remontant vers le sud juste au dessus de l'alternance précédente. Les échantillons sont prélevés sur un intervalle de 50m à 80m. Ils montrent des caractères similaires à ceux décrits pour la carrière. Les roches de ce terrain sont souvent recouvertes par des éboulis de pente caillouteux et plus ou moins indurés.

❖ Plus au sud, TT8 est un échantillon de calcaire provenant d'un gros banc, pluri métrique à décamétrique orienté N80°-25°S et se prolongeant vers l'est au delà du talweg.

❖ Plus au sud encore, TT9 est un échantillon prélevé d'une formation calco-dolomitique épaisse d'environ 100m, calée entre le banc précédent et un autre banc calcaire bien stratifié et formant, une partie du toit Barrémo-Aptien du massif.

L'examen de quelques lames minces provenant des deux sites montre :

✓ Une dolomie à distribution unimodale finement grenue (**Photo 9.30**) à moyennement grenue (**Photo 9.31**) qui correspond à une dolomie planaire avec de rares cristaux automorphes et ne montrant aucune trace apparente d'organisme. Ce faciès peut présenter une porosité importante ainsi qu'une fracturation intense comme le montre la **Photo 9.32**.

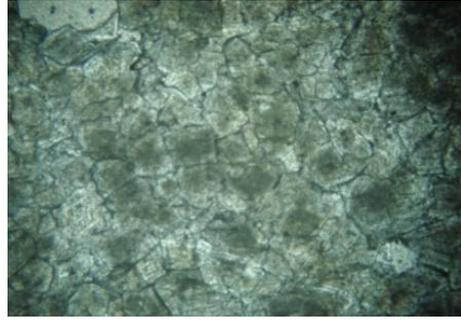
Il existe un deuxième type de dolomie à distribution polymodale renfermant surtout des rhomboèdres de taille micrométrique avec une zonation de croissance. Il s'agit d'une dolomie à cœur sombre et bordure claire.

Par ailleurs, il y a un autre type de dolomie à distribution polymodale en majorité de forme rhomboédrique (**Photos 9.33 et 9.34**) où les cristaux de taille du micromètre, montrent un cœur sombre et un pourtour clair comme certaines dolomies du Crétacé. Dans le ciment subsiste encore des traces de micrite (**Photos 9.35**). Les espaces poreux sont remplis par des oxydes de fer qui peuvent se répartir également dans les espaces intergranulaires (**Photos 9.36**) ou s'incruster dans les microcristaux qui cimentent les rhomboèdres de dolomie (**Photos 9.37**).

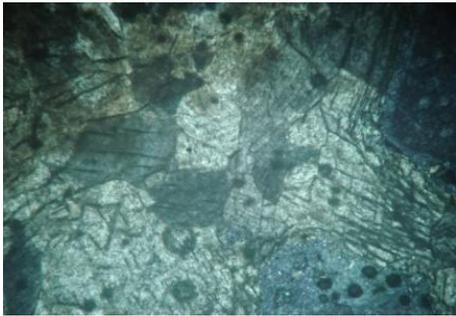
Dans cette dolomie à porosité plutôt élevée, les cristaux de dolomite subautomorphes à automorphes de taille dépassant les 200  $\mu\text{m}$ , parfois à cœur micritique.



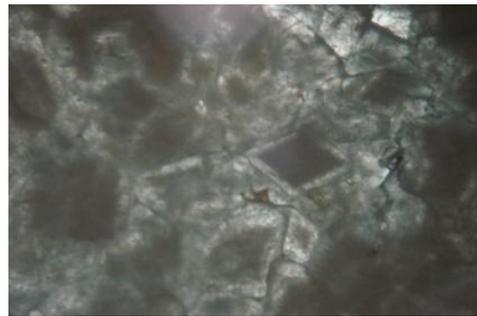
**Photo IX.30**



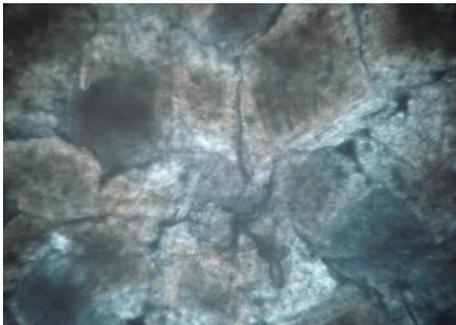
**Photo IX.31**



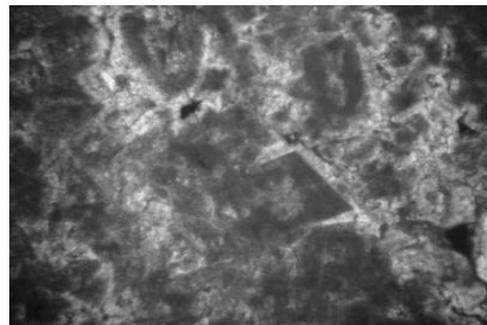
**Photo IX.32**



**Photo IX.33**



**Photo IX.34**



**Photo IX.35**



**Photo IX.36**



**Photo IX.37**

**Fig. 9.30 à 9.37** Photos d'observations microscopiques dolomies de Télioualt

### 9.4.3. Analyses chimiques, traitement des données et interprétation

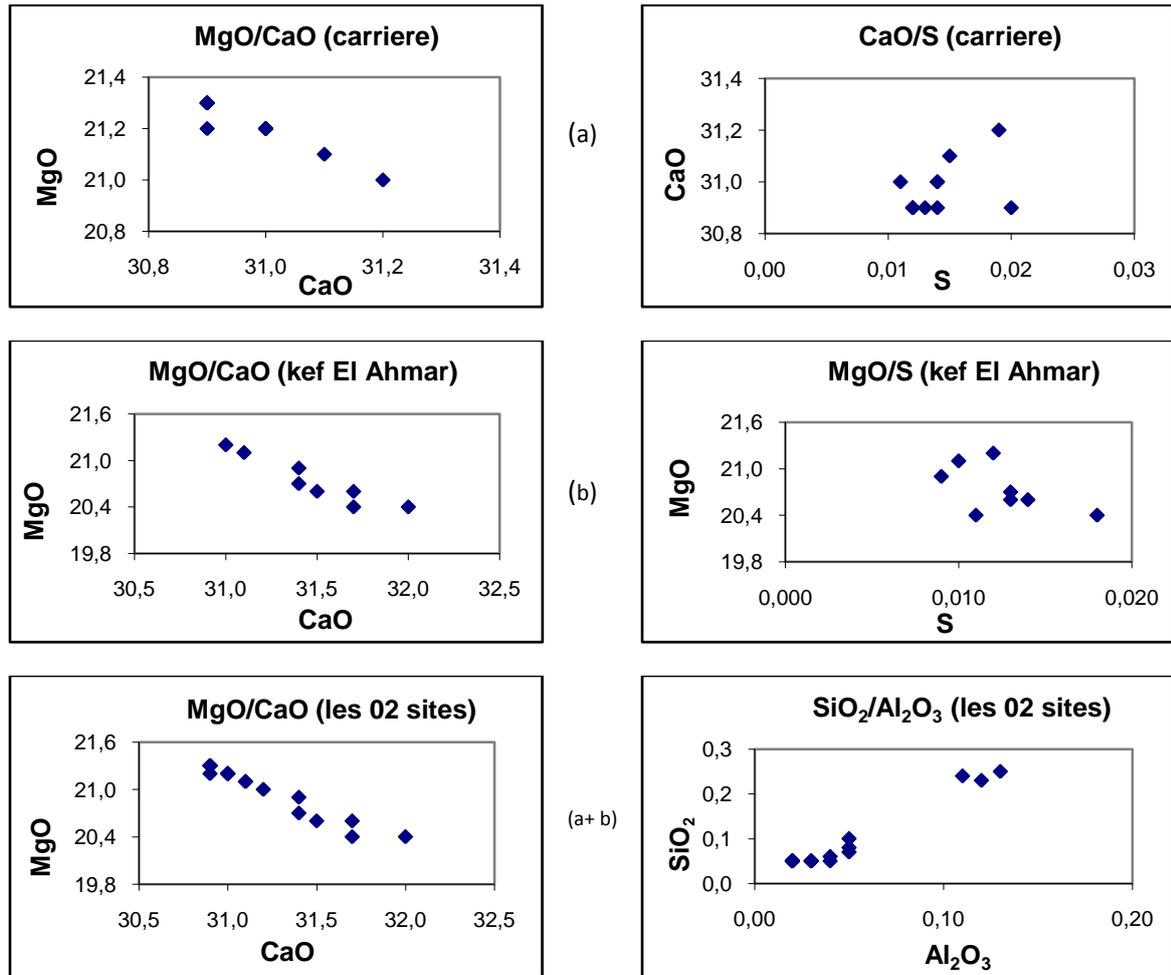
Les résultats des analyses pour les deux sites figurent sur le tableau (Tab. 9.38) suivant, **TT8 non compris** :

Site name	Echantillon	Analyses (%)						
		CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	S	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO
Kef_El_Ahmar	TT1	31,700	20,400	0,050	0,018	0,240	0,110	0,016
	TT2	31,400	20,900	0,010	0,009	0,050	0,030	0,002
	TT3	31,100	21,100	0,010	0,010	0,050	0,020	0,002
	TT4	31,500	20,600	0,020	0,014	0,230	0,120	0,007
	TT5	31,400	20,700	0,020	0,013	0,250	0,130	0,007
	TT6	31,000	21,200	0,010	0,012	0,050	0,020	0,009
	TT7	32,000	20,400	0,010	0,011	0,050	0,020	0,002
	TT9	31,700	20,600	0,020	0,013	0,100	0,050	0,003
	<b>Moyenne</b>	<b>31,475</b>	<b>20,738</b>	<b>0,019</b>	<b>0,013</b>	<b>0,128</b>	<b>0,063</b>	<b>0,006</b>
	<b>Ecart type</b>	<b>0,328</b>	<b>0,302</b>	<b>0,014</b>	<b>0,003</b>	<b>0,095</b>	<b>0,049</b>	<b>0,005</b>
Carr. Teioualt	TT10	30,900	21,300	0,040	0,020	0,050	0,040	0,004
	TT11	31,000	21,200	0,010	0,014	0,050	0,030	0,002
	TT12	30,900	21,300	0,010	0,012	0,050	0,020	0,002
	TT13	30,900	21,300	0,010	0,012	0,050	0,020	0,002
	TT14	30,900	21,200	0,010	0,014	0,080	0,050	0,002
	TT15	30,900	21,300	0,010	0,013	0,050	0,020	0,002
	TT16	31,000	21,200	0,010	0,014	0,050	0,030	0,002
	TT17	31,200	21,000	0,010	0,019	0,070	0,050	0,005
	TT18	31,100	21,100	0,010	0,015	0,050	0,030	0,002
	<b>Moyenne</b>	<b>30,978</b>	<b>21,211</b>	<b>0,013</b>	<b>0,015</b>	<b>0,056</b>	<b>0,032</b>	<b>0,002</b>
	<b>Ecart type</b>	<b>0,103</b>	<b>0,099</b>	<b>0,009</b>	<b>0,003</b>	<b>0,011</b>	<b>0,011</b>	<b>0,001</b>

**Tableau 9.38:** Analyses chimiques, dolomies de Téioualt (Lhoist, 2008)

*Ces résultats (carrière et Kef El Ahmar) sont tout à fait comparables aux données obtenues antérieurement. Ils montrent que la dolomie de Téioualt, riche en MgO, pauvre en composants nuisibles (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, S) est de bonne qualité.*

A partir de ces données, quelques diagrammes binaires font ressortir des tendances corrélatives entre éléments analysés (Fig. 9.39).



**Fig.9.39-Graphiques de corrélation:(a)carrière;(b) Kef El Ahmar;(a+b les deux sites).**

L'une d'elles, négative, indique les comportements antagonistes du Ca et de Mg dans les dolomies ; une autre, positive, montre au contraire un rapprochement de SiO<sub>2</sub> et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> qui suggère la présence de phases accessoires (argileuses) dues à l'altération météorique, accompagnant ces dolomies. D'autres tendances sont moins significatives en raison du nombre réduit d'échantillons.

Ces résultats (carrière et Kef El Ahmar) sont tout à fait comparables aux données obtenues antérieurement. Ils montrent que la dolomie de Téioualt, riche en MgO, pauvre en composants nuisibles (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, S) est de bonne qualité. La détermination de quelques paramètres physico-mécaniques ainsi que la réalisation de tests de cuisson complémentaires sont des actions à entreprendre en laboratoire. Celles-ci couplées à un suivi du comportement thermique du produit à l'échelle industrielle, (par exemple au niveau des fours à chaux opérationnels en sidérurgie) confirmeraient sur les aptitudes réelles de ce produit.

## **CHAPITRE 10. ANALYSES, TESTS ET ESSAIS DE CUISSON.**

### **CAS D'APPLICATION**

L'ensemble de ces analyses et essais est réalisé dans le laboratoire central du groupe LHOIST, à Nivelles, en Belgique.

#### **10.1. Analyses thermiques (ATG et ATD). Cas de Télioualt**

Les échantillons soumis aux analyses - thermogravimétrique (ATG) et thermique différentielle (ATD) - sont des dolomies composites. Elles résultent d'un mélange à parts égales de fragments : *ANB 49, ANB 52 et ANB 53* (correspondants respectivement à TT1, TT4 et TT5 : voir tableau analyses) *formant un premier lot et* de fragments : *ANB 50, ANB 51, ANB 54 et ANB 55* (correspondant à TT2, TT3, TT6 et TT7). Ce deuxième lot est légèrement moins riche en fer que le premier. Ces échantillons de dolomies crues proviennent du site de **Kef El Ahmar (Télioualt)**, (*Voir Fig. 36 Chapitre 9., Photo de gauche.*)

Les matériaux testés sont des poudres fines de granularité moyenne [0-50 µm], résultant d'une mouture dans un broyeur à disque oscillant (comme ceux destinés aux analyses par XRF). L'appareillage utilisé et les conditions opératoires sont ceux habituellement pratiqués par ce laboratoire pour ce type de manipulation.

Les résultats de ces analyses apparaissent sous forme de graphes dans les figures **10.1(Composite1)** et **10.2(Composite2)** suivantes. Les principales conditions instrumentales sont indiquées en marge de ces graphes. Notons en particulier les paramètres suivants :

- température de démarrage de la manipulation : 30.8 (°C) ;
- vitesse de chauffage : 5/100 de minute (mn) avec enregistrement simultané de la perte de poids ;
- arrêt de l'expérience après 97 mn 30/100 (après arrêt de la perte de poids)...

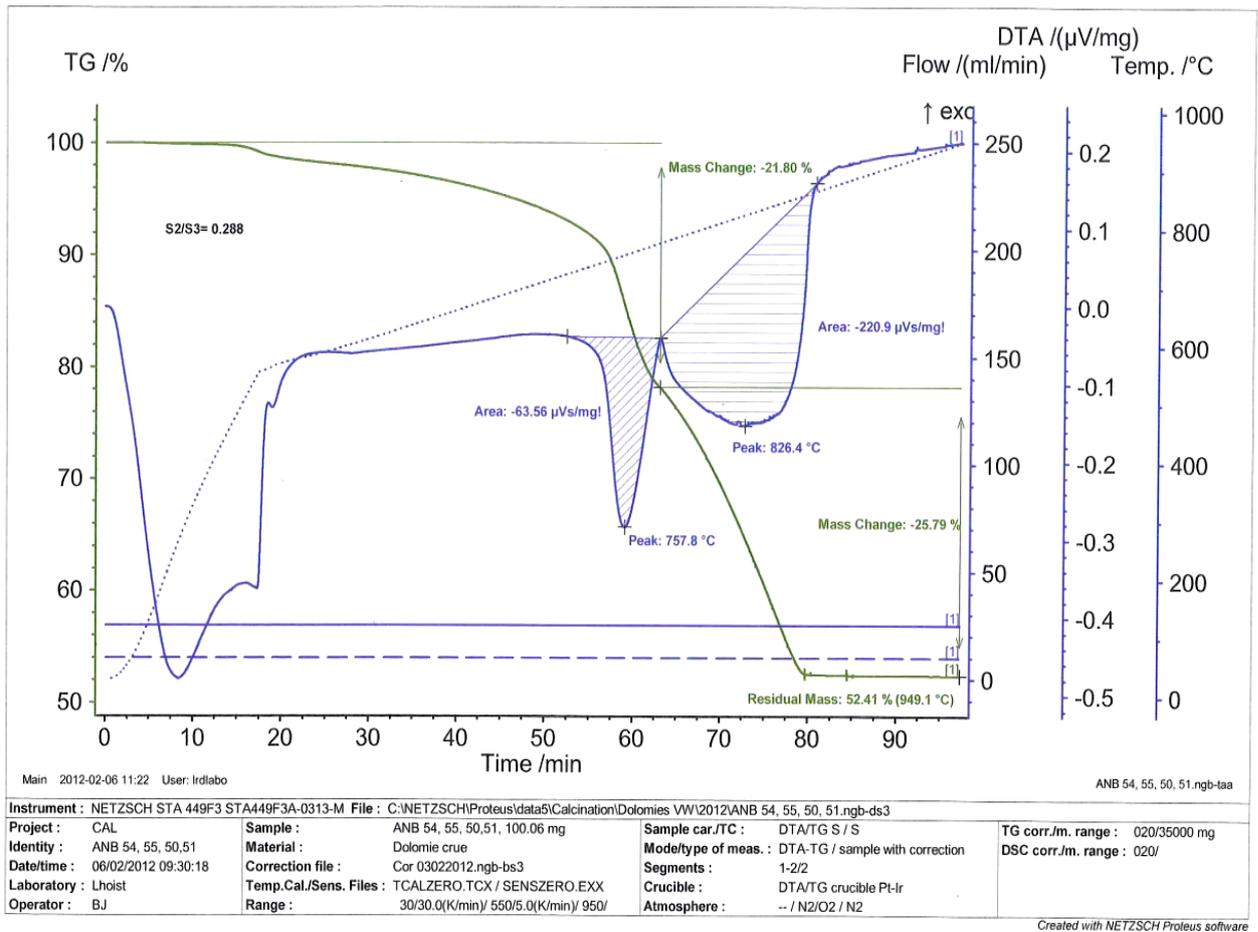


Fig.10.1-Courbe ATG-ATD, *composite 1*, (Kef El Ahmar, Téioualt)

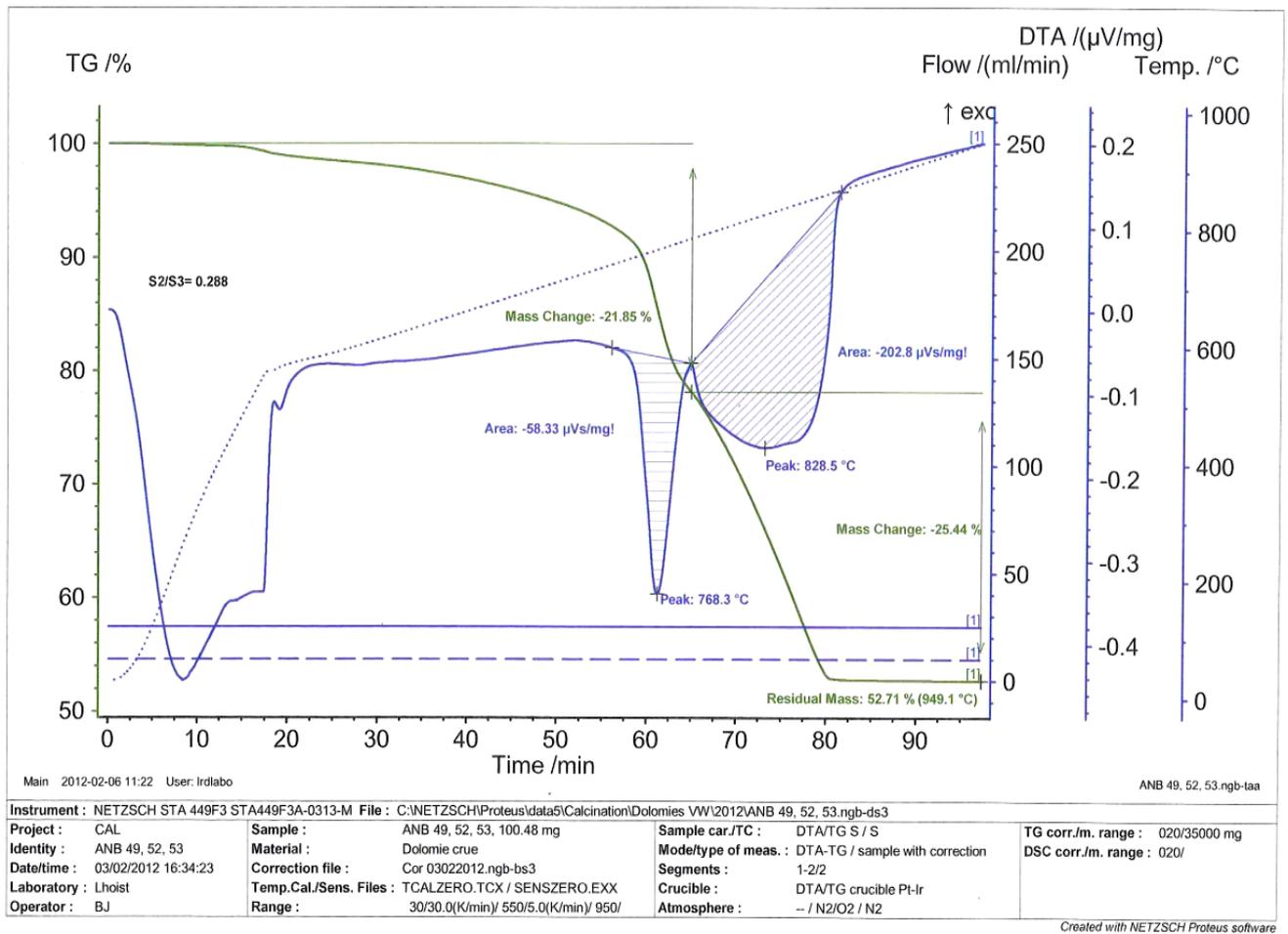


Fig.10.2- Courbe ATG-ATD, composite 2, Kef El Ahmar (Téioualt).

Dans ces graphes figurent différentes courbes. Chaque courbe exprime un paramètre.

- ✓ La courbe en pointillés ou courbe des montées en température (en %, axe des ordonnées à l'extrême droite).
- ✓ La courbe: ATG, montrant bien en continu- en fonction de l'élévation de température- la perte en poids (axe des ordonnées à gauche).
- ✓ La courbe en: ATD, montrant bien en continu - en fonction de l'élévation de température - l'absorption d'énergie dans le cas d'une réaction endothermique comme la décarbonatation.

L'ATD confirme la décarbonatation en 2 étapes, typiques des dolomies : d'abord  $\text{MgCO}_3$  respectivement à 758 et 768°C puis  $\text{CaCO}_3$  respectivement à 826 et 829°C.

Notons un premier pic plus marqué pour la dolomie du 1<sup>er</sup> lot « riche en fer » que pour celui du 2<sup>e</sup> lot (pauvre en fer).

## 10.2. Tests d'essais physiques sur calcaires de DJENDEL et du KHROUB

### 10.2.1. Préparation des composites, types d'essais

Trois lots d'échantillons bruts sont sélectionnés pour être soumis à des tests de caractérisation physiques et de cuisson ; les lots sont des composites à granularité moyenne [5 ; 250mm] :

- Deux en provenance de Djendel : **ANB 19 et ANB 20** correspondant (voir tableau des données 9.3)
  - pour ANB 19 à un mélange de D 6) et de D 10 (fragments aval concasseur primaire carrière) et,
  - pour ANB 20 au mélange de D 11 et D15,
- les troisièmes viennent du Khroub. **ANB 67** est un composite prélevé du tas à l'aval du concasseur primaire de la carrière.

Chaque lot a subi une première fragmentation d'où sont prélevées, en quantités égales, des fractions [(5, 15 mm)].

- De chaque fraction une quantité représentative est dégagée. Elle sera soumise à un broyage dans un broyeur à disque oscillant. Cette mouture est destinée aux analyses chimiques (permettant le dosage de trente deux (32) oxydes et éléments simples) par *spectrométrie de fluorescence des rayons X (XRF)*.

Des analyses par *spectrométrie d'absorption atomique (AAS)* sont effectuées *en double* pour Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et MnO.

***Quelques fragments de ces calcaire servent à mesurer des paramètres physiques tels que :***

- absorption d'eau,
  - porosité et masse volumique apparente des calcaires.
- Le reste des lots [5, 15mm] est soumis à un protocole de calcination atteignant quatre niveaux de températures (ou paliers de référence) à **980, 1060, 1140 et 1200°C** en vue de déterminer **les réactivités des chaux** ainsi obtenues, comparées à celles provenant d'échantillons de référence - LHOIST, [A. et B.- sur les graphes 10.7 et suivants- donnés ici à titre indicatif].
- Par ailleurs, des tests sont réalisés pour évaluer différents indices appelés *indice de délitage statique (SBI)*, *indice de fragmentation à la chute (STI)* et *indice d'attrition (ATI)*... Ces paramètres, déterminés par des essais normalisés, mesurent des pertes de matière occasionnées durant et surtout après la cuisson en cours de manipulation de la chaux produite. Ces pertes, sous forme de particules fines, ne sont pas souhaitables si leur quantité devient excessive.

### 10.2.2. Analyses chimiques des échantillons composites ANB 19, ANB 20 et ANB 67

Les résultats sont donnés dans le tableau suivant (TAB.10. 3)

Weight content (%)	ANB 19	ANB 20	ANB 67
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02	0.01	0.01
As (ppm)			
B (ppm)			
BaO (ppm)	1.2	1.2	1.0
C org	0.07	0.07	0.07
CaO	55.6	55.6	55.7
Cd (ppm)			
Cl (ppm)			
Co (ppm)			
Cr (ppm)			
Cu (ppm)			
F (ppm)			
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.03	0.03	0.02
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (AA)	0.027	0.029	0.012
Hg (ppm)			
K <sub>2</sub> O (ppm)	2	2	8
MgO	0.17	0.18	0.10
MnO	0.004	0.005	< 0.001
MnO (AA)	0.0036	0.0044	0.0006
Mo (ppm)			
Na <sub>2</sub> O (ppm)	4	5	41
Ni (ppm)			
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (ppm)	113	66	47
Pb (ppm)			
PF	43.9	43.9	43.8
S	0.001	0.002	0.001
Sb (ppm)			
Se (ppm)			
SiO <sub>2</sub>	0.07	0.05	0.05
Sn (ppm)			
SrO	0.011	0.010	0.014
TiO <sub>2</sub> (ppm)	26	12	< 17
V (ppm)	0.2	0.3	0.6
Zn (ppm)	2.1	4.3	1.9

Tab.10.3- Analyses chimiques des échantillons composites (Djendel et El Khroub, LHOIST 2011).

Ces analyses révèlent la grande pureté de ces calcaires et leur pauvreté en éléments traces : beaucoup d'éléments sont en dessous des limites de détection.

*Il faut noter la bonne convergence des analyses par XRF et par AAS pour Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et MnO.*

### 10.2.3. Coefficient d'absorption d'eau (WA)

On pèse les échantillons de calcaire avant et après immersion dans l'eau durant 24 heures, selon un protocole défini par la norme EN 1097-6. Les résultats figurent dans le tableau 10.4, y compris ceux des échantillons de référence :

Sample Reference	WA/24h
A	14.00
B	0.67
ANB 19	1.07
ANB 20	1.11
ANB 67	2.95

Tab. 10.4- Valeurs des coefficients d'absorption d'eau (WA).

Il apparait clairement que nos échantillons sont peu avides d'eau ( $WA/24H < 3$ ), ceux de Djendel nettement moins que ceux du Khroub.

#### 10.2.4. Tests de porosité et de masse volumique apparente des calcaires

Ces paramètres sont évoqués au chapitre III, leurs mises en œuvre obéissent à des normes spécifiques. Les résultats figurent dans le tableau 10.5

Sample Reference	Hg_Porosity (%)	Density (g/cm <sup>3</sup> ) (*)
A	28.3	1.94
B	2.3	2.65
ANB 19	3.0	2.63
ANB 20	2.6	2.64
ANB 67	6.7	2.53

(\*) calculation based on theoretic density of calcite (2,71 g/cm<sup>3</sup>)

Tab.10.5- Valeurs des porosités et des densités des composites.

Pour l'échantillon du Khroub, la porosité plus élevée, explique la valeur relativement faible de sa densité.

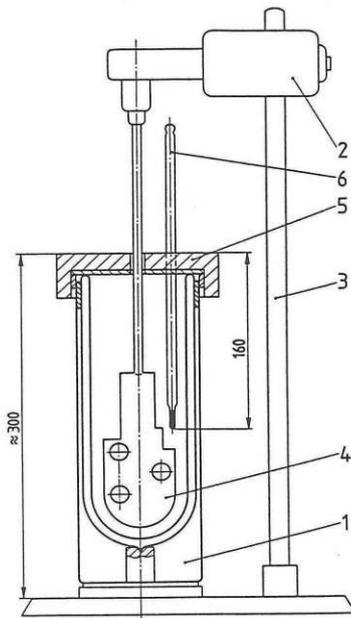
#### 10.2.5. Réactivité à l'eau de la chaux vive

C'est sans doute le test le plus significatif pour caractériser la qualité d'une chaux vive. Rappelons (Chapitre III) que sa mesure est destinée à connaître la quantité de chaleur mise en jeu pour atteindre une température de 60°C qui correspond au temps nécessaire ou ( $t_{60}$ ) pour que la température du mélange d'eau (600 ml) et d'une fraction fine de chaux vive [150 g à une granularité (0-1mm)] s'élève de 20° à 60°C. Le  $t_{60}$ , exprimé en minutes est un paramètre de référence.

L'essai est réalisé dans un récipient type Dewar ; l'élévation de température dans le récipient est suivie en continu en fonction du temps : c'est la courbe d'extinction par voie humide. La figure X.6 montre l'appareillage utilisé pour cet essai, la courbe d'extinction et l'expression des résultats.

Notons que pour une chaux dolomitique, la valeur de référence du temps de réactivité est  $t_{70}$ .

■ SLAKING DEVICE



- 1 Dewar thermostatic flask (1 l)
- 2 Mechanical stirrer
- 3 Stand
- 4 Agitator (stainless steel rod with 4 blades)
- 5 Cover with rubber gasket
- 6 Thermometer / Temperature probe

Lime -  $t_{60}$  (Norm DIN 1060 Teil 3)

600 ml of water at 20°C  
150 g of ground/milled lime

Dolime -  $t_{70}$  (Norm ASTM C 110-95)

400 ml of water at 40°C  
120 g of ground/milled dolime

■ SLAKING CURVE

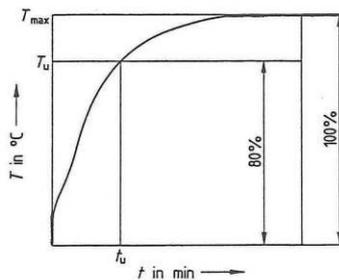


Fig. 10.6-. Appareillage de mesure de réactivité de la chaux, courbe d'extinction, et note concernant une autre mesure de réactivité (Lhoist).

**Remarque :** La titration acide Wuhrer est une autre méthode utilisée pour caractériser la réactivité des grains de chaux (en allemand référencée : Grobkorn titration). Elle consiste en la neutralisation des grains de chaux par un acide fort (HCl, 4N) : 2000ml d'eau à 40°C ; 50 g de chaux 1-10 mm (la fraction 0-1 mm tamisée et éliminée).

### 10.3. Tests de cuisson sur calcaires de DJENDEL et du KHROUB

#### 10.3.1. Test de réactivité

Les résultats du test de réactivité obtenus pour les composites précédents et les étalons internes de référence (A et B) apparaissent dans le graphe (Fig. X.7) à différentes températures de cuisson.

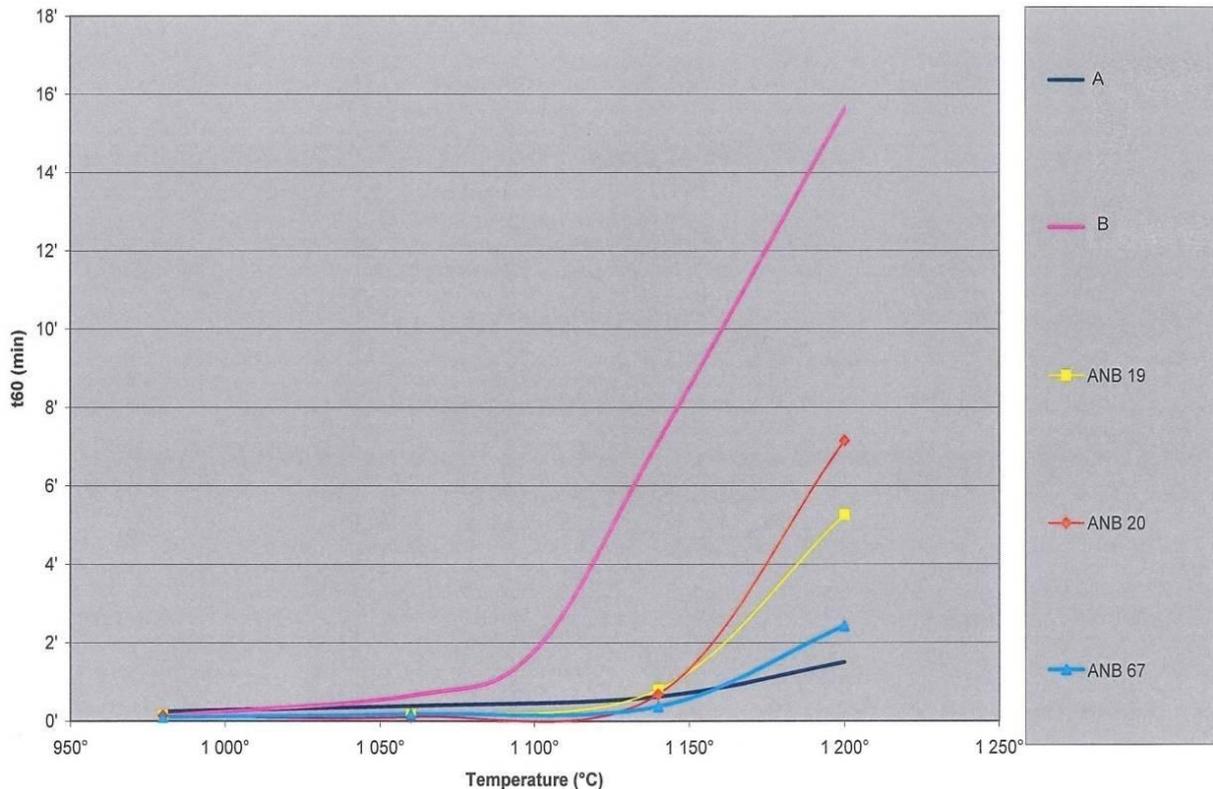


Fig. 10.7- Courbes de réactivité de chaux en fonction des températures de calcination, (LHOIST).

Les courbes de ces graphes montrent les  $t_{60}$  atteints par les échantillons pour chacun des paliers de cuisson (980, 1060, 1140 et 1200°C). Ces courbes sont comparées à celles des étalons (A et B).

Les  $t_{60}$  sont très vite atteints jusqu'à environ 1140°C. A cette température - où sont cuites la plupart des chaux commerciales - la réactivité est quasiment instantanée! Les échantillons peuvent être considérés comme sensibles aux températures de calcination inférieures à 1170°C ( $t_{60} \leq 2mn$ ). A 1200°C, cette sensibilité est nettement plus marquée pour El Khroub [ $t_{60}$  à peine au dessus de 2 minutes (mn)] que pour Djendel ( $t_{60}$  dépasse les 5mn et même les 7mn...).

Il est à noter que toutes ces chaux présentent des réactivités peu élevées aux basses températures de calcination.

### 10.3.2. Indices de « production de fines » à différentes températures

Les tests permettant d'obtenir ces indices consistent à déterminer les proportions de fines (<5, <4, <2 mm) provenant de chaux cuites aux températures de référence précitées. Ces chaux, en quantités déterminées, proviennent elles mêmes de quantités appropriées des calcaires de granularité (5 ; 15 mm). Les tests diffèrent par leurs mises en œuvre. Les graphes que nous produisons pour les différents indices sont relatifs aux proportions de fines (<5 mm).

#### a)- Indice d' « effritement statique » ou *Static Breakdown Index (SBI)*

Les quantités de débris, pesés aux différents paliers de cuisson, sont le résultat de la seule « fragilisation » ou effritement des échantillons survenu après calcination.

A titre d'exemple, la figure 10.8 montre les courbes joignant les proportions de débris < 5 mm obtenus aux différentes températures de référence (les résultats obtenus avec les échantillons de référence apparaissent également sur ces graphes).

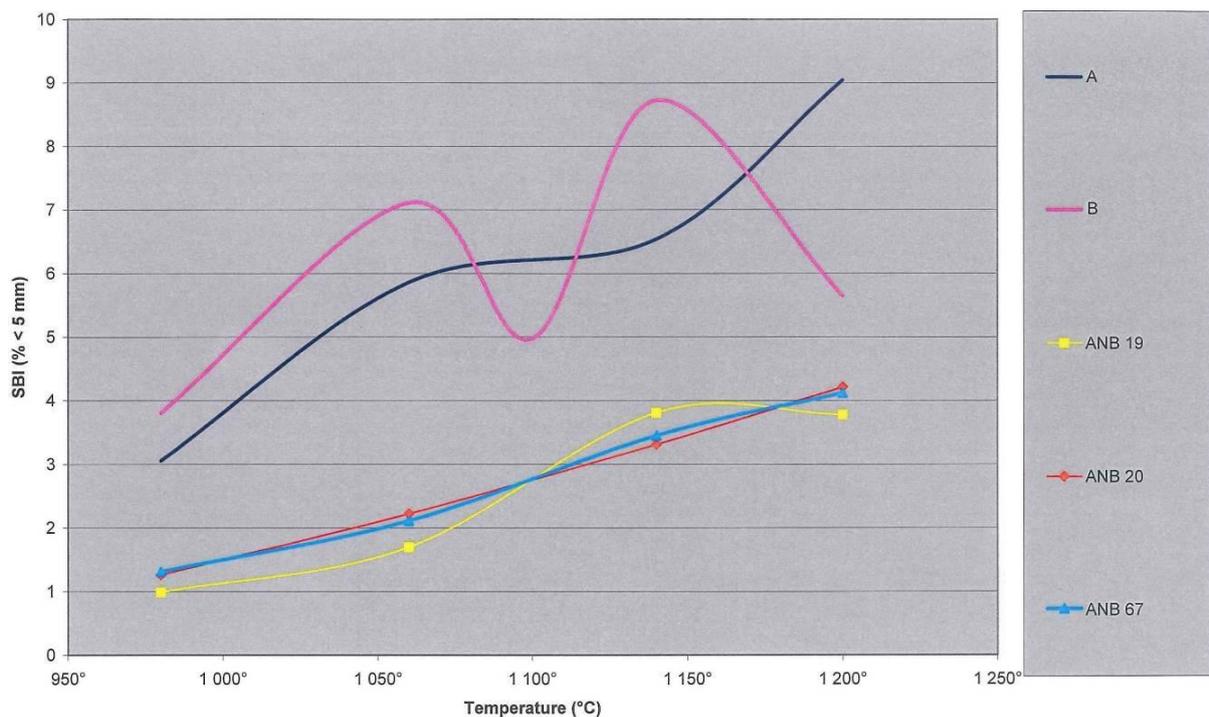


Fig. 10.8 - Graphique des indices d' « effritement » ou *Static Breakdown Index* (SBI % < 5 mm).

Notons que les pourcentages de fines aux différents paliers de températures sont nettement moins abondants pour les échantillons de Djendel et El Khroub (seulement 1% aux basses températures et près de 4% à 1200°C) que pour ceux des calcaires de référence (près de 6% en moyenne). Dans le premier cas, ces proportions augmentent modérément avec la température

et de façon presque linéaire. Ce constat montre que l'effritement a tendance à augmenter légèrement avec l'élévation de température.

**b)- Indice de « vulnérabilité » ou Shatter Test Index (STI)**

Cet indice sert à déterminer les pourcentages de particules fines (<5 mm) issues de la chute-dans un récipient approprié-de fragments de chaux, sur une hauteur de 02 m. Fragments obtenus à chacune des températures de référence (980, 1060, 1140 et 1200°C). L'essai est répété *quatre fois* par lot d'échantillon et par palier de cuisson. Les résultats des pesées de fines en fonction de la température sont portés sur le graphe (Fig. 10.9). Ceux des échantillons de référence y figurent également.

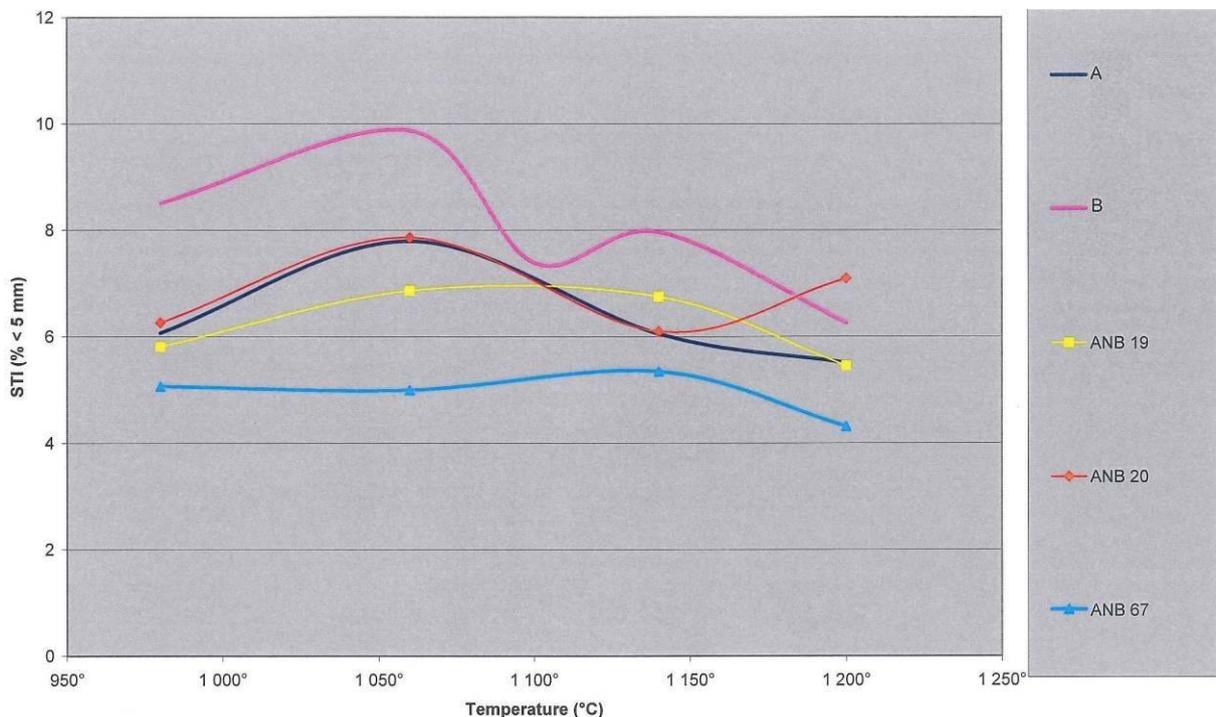


Fig. 10.9.-Graphique des indices de vulnérabilité de chaux (STI) de Djendel et du Khroub.

Les indices d'usure par attrition atteignent des valeurs comprises entre 6 à 8% pour les chaux de Djendel. Les valeurs de ces indices fluctuent d'une température de cuisson à l'autre et de plus, ces variations diffèrent d'un échantillon à l'autre avec une tendance à la diminution aux hautes températures (Fig.10-9). Pour El Khroub, ces valeurs sont plus faibles et assez constantes. Elles sont proches de 5% et arrivent même à 4.2% à 1200°C. Par ailleurs, ANB 20 s'use de la même manière que le standard A jusqu'à la température de 1140°C, puis diverge. Plus généralement, l'usure ne semble pas suivre la montée en température, même s'il y a une tendance à un léger fléchissement de cette usure vers 1200°C.

**c)- Indice d'usure par frottement ou Attrition Test Index (ATI)**

Le test consiste à déterminer les proportions de fines résultant de l'usure d'échantillons de chaux [toujours issus des calcaires de granularité (5 - 15 mm)] cuits aux températures de

référence et soumis chaque fois à des rotations de 5 minutes dans un tambour cylindrique normalisé. Les courbes des indices d'usure pour les échantillons aux différentes températures de cuisson ressortent sur les courbes données dans le graphe (Fig. 10.10) ci-après.

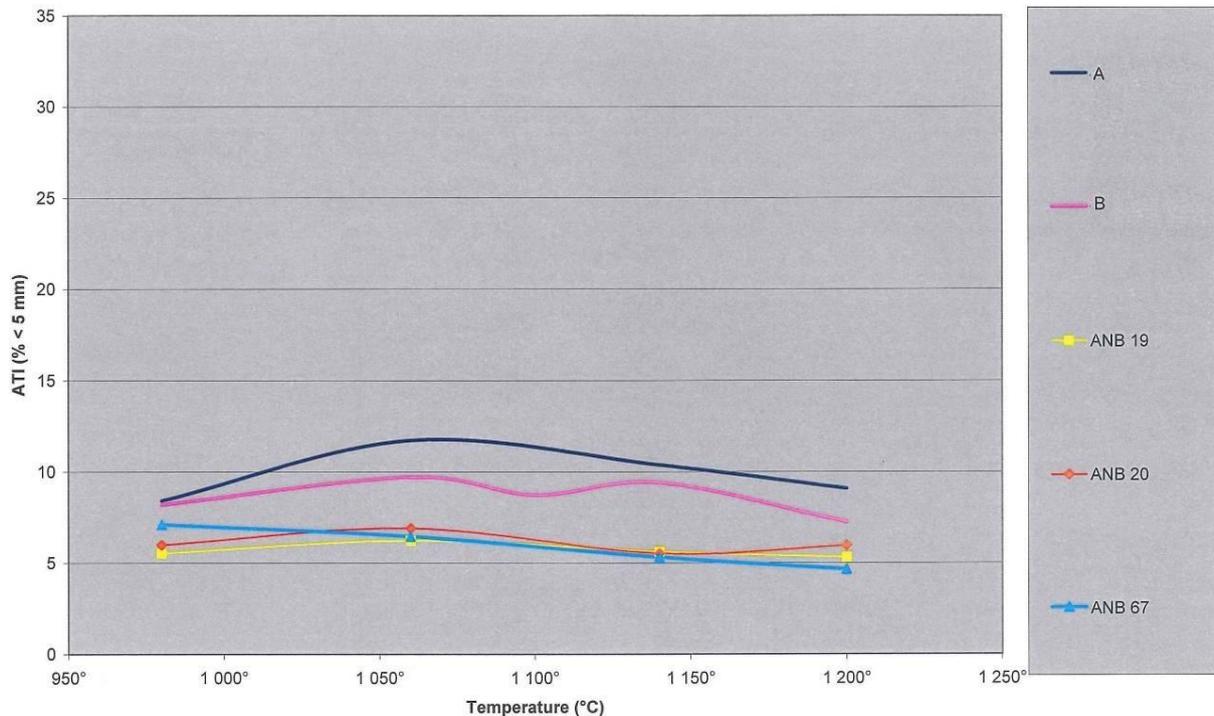


Fig. 10.10- Graphe des indices d'usure par attrition(ATI) aux différents paliers de calcination.

L'usure mesurée par ce test est relativement faible et varie peu avec l'élévation de température. Elle se situe dans une fourchette limitée et comprise entre 5 et 7%, inférieure à celle obtenue pour les échantillons de référence.

### - Synthèse

Les analyses et tests physico-chimiques ainsi que les essais de cuisson réalisés sur des échantillons prélevés de nos sites d'étude donnent des résultats encourageants pour la transformation des calcaires et dolomies en chaux.

- Considérons les calcaires de Djendel (et ceux de Ben Azzouz, par extension).
  - Ces calcaires sont homogènes dans l'ensemble quoique nécessitant quelquefois une exploitation sélective pour éviter les zones d'accidents tectoniques et les éventuelles hétérogénéités dues aux matériaux de remplissage des fissures ou à l'augmentation du taux de SiO<sub>2</sub>;

➤ Ces calcaires ont une pureté chimique élevée : riches en CaO et pauvres en éléments traces. Les tests effectués sur un composite du matériau provenant uniquement de Djendel ont donné un faible coefficient d'absorption d'eau ( $WA/24h = 1.06$  à  $1.11$ ) et une porosité moyenne ( $2.63$  à  $2.64g/cm^3$ );

➤ Les chaux obtenues par les tests de cuisson sont à réactivité moyenne à bonne et leurs degrés de friabilité se situent dans des marges très acceptables du moins pour les applications sidérurgiques.

- Les calcaires du Khroub, exploités sélectivement, produisent des granulats de qualité supérieure des points de vue physico-chimiques et mécaniques. Ils fournissent également des matériaux propices à la production de poudres de carbonate de calcium de pureté élevée. Ils ont subi des tests et essais de cuisson sur des composites qui ont révélé des comportements physiques et thermiques très performants.

- Quant aux dolomies de Télioualt, leur faible rythme d'extraction actuel est appelé à augmenter dans le cas d'une demande plus accrue dans le domaine de la sidérurgie. Le minerai est d'excellente qualité chimique et physico-mécanique y compris l'aspect thermique comme en témoignent les analyses chimiques effectuées sur des échantillons par l'exploitant de la carrière ainsi que nos propres données. Cette dolomie offre aussi les qualités de son utilisation en verrerie, dans les boues de forage et surtout en sidérurgie. Mais le plus gros de la production actuelle est juste transformé en granulats pour assurer un minimum de rentabilité à son exploitant. Ce géomatériau de valeur connaît actuellement un sous emploi faute du tissu industriel approprié, en aval.

Tous ces sites ont des potentialités -sur place ou rapprochées- valorisables, demandant un complément de prospection qui mettra en relief les secteurs ou zones les plus favorables à l'ouverture de carrières et le cas échéant à l'implantation d'industries de transformation rentables, peu polluantes et pérennes.

Les résultats des analyses, tests et essais obtenus à partir de nos sites sont favorables à la production de chaux. Ils ouvrent des perspectives au développement nécessaire de ce secteur et au lancement de nouvelles variétés de chaux. Ces variétés auront l'avantage de couvrir des besoins vitaux (Traitement des eaux potables, des effluents et autres déchets) et diverses industries utiles à des applications nouvelles à développer en marge de la sidérurgie...

D'autres prospects restent à lancer dans les carbonates de la fin du Secondaire (Lias-Néocomien) et dans ceux du Crétacé Supérieur (Cénomaniens-Aptiens), abondant dans le nord-est algérien et au-delà.

## CONCLUSION

Produire de la chaux de manière rentable à partir de calcaires et dolomies implique le passage avec succès par un nombre plus ou moins important d'étapes allant de la découverte de la matière première adéquate à la commercialisation du ou des produits finis. Ces étapes nous ont amené à définir ce qu'est la chaux (Au fait il y en a plusieurs, presque autant qu'il y a d'usages consacrés !). Quelles sont ses principales caractéristiques, en commençant d'abord par celles des calcaires et des dolomies. Si cette chaux est utilisée depuis la plus haute antiquité comme le montre son histoire à travers les âges, sa connaissance véritable n'a démarré qu'avec l'essor de la sidérurgie moderne c'est-à-dire entre la fin du 19<sup>e</sup> et le début du 20<sup>e</sup> siècle. Son historique est évoqué. Quelques documents de référence sont cités en marge de références bibliographiques...

Un rappel des usages les plus courants des carbonates naturels, mais surtout de la chaux qui en dérive montre l'importance de ces géomatériaux dans la vie courante. De plus, pour cette dernière, une attention particulière a été portée sur le processus de sa fabrication, depuis les installations de cuisson, les précautions de leurs conduites jusqu'à l'obtention des chaux commerciales (Chaux vives et chaux éteintes).

L'aspect économique est abordé dans un cadre global, mondial d'abord, pour donner un aperçu sur la consommation, la structure et les spécificités d'un tel marché dominé par les pays développés et quelques pays émergents. Il faut retenir à ce niveau que la chaux, produit aux usages de plus en plus étendus, dont le degré de connaissance ne fait que s'affiner au fil des jours, est un produit vulnérable. D'abord la durée de son stockage est limitée, un peu comme le ciment, mais surtout il s'agit d'un produit à la fois pondéreux et à faible valeur ajoutée. Sa fabrication et son usage sont donc forcément à portée locale. De plus, sa fabrication rentable nécessite une matière première suffisamment abondante et chimiquement pure. Ce qui n'est pas toujours offert par la nature! N'empêche que les incidences positives de son champ d'application, compensent de tels inconvénients, surtout dans les pays disposant d'un tissu industriel non négligeable.

En Algérie, La chaux traditionnelle mais surtout la chaux industrielle est connue et fabriquée. Cette dernière variété couvre à peine les besoins de la sidérurgie et de quelques utilisateurs de petites industries. La production est appelé à s'intensifier pour répondre aux besoins de plus en plus importants des utilisateurs actuels et à venir tels que ceux du traitement des eaux, de la pollution et ceux d'autres secteurs d'activité. Les carrières en activité, notamment celles qui disposent de potentialités plus ou moins avérées (Djendel, Téioualt), doivent être valorisées. Dans les terrains sédimentaires du NE algérien affleurent de nombreuses reliefs carbonatés, calcaires surtout, des sites favorables sont à rechercher au moyen de campagnes de prospections appropriées dans les formations du néritique constantinois ou celles de la dorsale kabyle pris à titre d'exemple. En Algérie du Nord, les

sédiments de la fin du Jurassique : (Lias, Néocomien) et celles du Crétacé (Cénomaniens, Turonien, Aptien) recèlent des potentialités affleurantes appréciables en carbonates. Ces potentialités sont valorisables pour répondre aux exigences de leur transformation. Des usines à chaux pourront dès lors être implantées près des futures carrières, aux emplacements les plus opportuns.

La géologie régionale est abordée ici comme préalable à la démarche suivie. Elle concerne surtout la description du domaine « Prékabye » et celles des formations néritiques constantinoises. L'accent est ensuite mis sur les carrières retenues et leurs environnements respectifs, celles de calcaire-voisines- du massif de Safia : Djendel et Ben Azzouz dans le premier contexte puis celles de calcaire du Khroub et, un peu plus au sud, celle de dolomie de Téioualt qui font partie du second ensemble structural.

Pour chacune de ces carrières, des rappels sont faits sur les travaux de prospection réalisés auparavant et leurs résultats ainsi que sur le déroulement des travaux miniers actuels. A des périodes données, des prélèvements d'échantillons-adaptés à chaque site-ont été opérés en vue de caractérisations physico-chimiques des matières premières en prévision de nouvelles applications.

Les résultats des analyses et de différents tests et essais montrent qu'au-delà de leurs utilisations comme granulats pour les besoins de la construction, le calcaire de Djendel, utilisé cru et transformé en chaux pour la sidérurgie est conforme et bien adapté à cette dernière application. De plus les potentialités des matières premières en place sont suffisamment importantes.

Un résultat similaire peut être attendu à Ben Azzouz, mais des précautions sont à prendre en raison de la fracturation. L'augmentation sporadique du taux de magnésium peut en être associée. Le sous-bassement du niveau exploité étant dolomitique. L'exploration de cette assise dolomitique pourra devenir intéressante à l'avenir.

Pour la sidérurgie au moins les résultats obtenus pour la dolomie de Téioualt sont très encourageants. La matière première est non seulement homogène mais de bonne qualité. Elle pourra servir plus utilement à des applications industrielles qu'à servir de granulats d'autant plus que ses réserves semblent très prometteuses moyennant un complément de prospection.

Les résultats des analyses effectuées et des tests et essais réalisés sur les échantillons de calcaire du Khroub ont donné les meilleurs résultats tant pour leur qualité chimique, que pour leur comportement thermiques durant les essais de cuisson en vue de leurs transformations en chaux de différentes qualités. Toutefois, leur potentialités semblent bien limitées d'où l'imminence de lancement de nouvelles prospections en direction des niveaux calcaires prometteurs comme le sont ceux des formations cémano-turoniennes

prolongeant le site actuel. Ils pourront être exploités tout aussi bien pour produire des carbonates de calcium. Ce produit est d'un grand intérêt. Plus facile à produire, il connaît lui aussi des applications croissantes dans un grand nombre de domaines. Le calcaire de qualité pourra être transformé en chaux, du moins quelques variétés les plus maîtrisables et les plus indispensables, si les conditions adéquates sont réunies. Un souci particulier sera porté au choix de technologies les moins polluantes mises au point à ce jour. Limiter la pollution sous toutes ses formes est une nécessité garante d'un développement durable.

## BIBLIOGRAPHIE

**NOTE** : Les quatre premières parties de ces titres sont gracieusement mises à disposition par le groupe LHOIST et largement consultées pour les besoins de cette thèse, excepté certaines revues et les titres en langue germanique. Une documentation complémentaire plus personnelle suit dans la cinquième partie.

### 1)- Ouvrages de référence :

#### Sédimentologie des carbonates :

- **ADAMS, A.E. & MACKENZIE, W.S.**, 1998. "A colour atlas of Carbonate sediments and rocks under the microscope" Manson Publ., London, 180 pp.
- **BATHURST, R.G.C.**, 1975. "Carbonate sediments and their diagenesis." Developments in sedimentology 12. Elsevier, Amsterdam, 658 pp.
- **BRIGHTWAITE, C.J.R.**, 2006. "Carbonate sediments and rocks." A manual for earth scientists and engineers. Whittles Publishing, Dunbeath, 196 pp.
- **CHANG, L.L.Y., HOWIE, R.A. & ZUSSMAN, J.**, 1996 "Rock-forming minerals". Volume 5B (2<sup>nd</sup> ed.) Non-silicates: sulphates, carbonates, phosphates, halides. Longman, London, 383 pp.
- **FLÜGEL, E.**, 2004. "Microfacies of carbonates rocks" – Analysis, interpretation and application. Springer, Heidelberg, 976 pp.
- **LIPPMANN, F.**, 1973. "Minerals, rocks and inorganic materials." Volume 6 – Sedimentary carbonate minerals. Monograph series of theoretical and experimental studies. Springer, Verlag, Berlin, 228 pp.
- **MORSE, J.W. & MACKENZIE, F.T.**, 1990. "Geochemistry of sedimentary carbonates." Developments in sedimentology 48. Elsevier, Amsterdam, 707 pp.
- **PURSER, B.H.**, 1977. Subdivision et interprétation des séquences carbonatées. Mém. Du BRGM.Fr, n° 77, pp.680-698.
- **PURSER, B.H.**, 1980 « Sédimentation et diagenèse des carbonates néritiques récents. » Tome I. Les éléments de la sédimentation et de la diagenèse. Editions Technip (Paris) & Inst. Franç. Pétrole (Rueil-Malmaison), 366 pp.
- **PURSER, B.H.**, 1983 « Sédimentation et diagenèse des carbonates néritiques récents. » Tome 2. Les domaines de sédimentation carbonatée néritiques récents ; applications à

l'interprétation des calcaires anciens. Editions Technip (Paris) & Inst. Franç. Pétrole (Rueil-Malmaison), 389 pp.

- **SCHOLLE**, P.A., 1978. “A color illustrated guide to Carbonate rock constituents, textures, cements and porosities.” Amer. Assoc.Petrol. Geol., Memoir 27, 241 pp.

- **SCHOLLE**, P.A., **BEBOUT**, D.G. & **MOORE**, C.H., (Eds.), 1983 “Carbonate depositional environments. Amer. Assoc.Petrol. Geol., Memoir 33, 708 pp.

- **TUCKER**, M.E. & **WRIGHT**, V.P., 1990. “Carbonate sedimentology.” Blackwell, London, 482 pp.

***Roches et minéraux industriels (carbonates en particulier)***

- **ANNELS**, A.E. (Ed.), 1992 « Case histories and methods in mineral resource evaluation.” Geol. Soc. Lond. Spec. Publ. N° 63, 313 pp.

- **Anonymous**, Land Use Consultants, assisted by EURONET & Widnell Chartered Surveyors, 1995. “Minerals planning policy and supply practices in Europe.” Report for the dept. of the Environment (U.K), London, 95 pp. (main report) +technical appendices.

- **Anonymous**, EURONET & Land Use Consultants, 1996. Minerals ownership and the law in Europe. Chartered Surveyors in a single European market. Report for the Royal Institution of Chartered Surveyors (UK), London, 55 pp. + country profiles+30 appendices.

- **Anonymous**, 2000. “Riverains de carrières.” Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement (Ministère de la région Wallonne) – collab. Inter-Environnement Wallonie, 81 pp.

- **ARQUIE**, G. & **TOURENQ**, Cl., 1990 « Granulats ». Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 717 pp.

- **BERKOWICZ**, M., 1990. « La Chaux pour bâtir et décorer. » Coll. Nathan pratique – collab. Balthazard et Cotte. Nathan Communication, Paris, 73 pp. – Réédité en 2003 par « le guide des Métiers de la Chaux » (Besançon).

- **BERTON**, Y. & **LEBERRE**, P., 1983. « Guide de prospection des matériaux de carrière.» Coll. Manuels et Méthodes, N° 5. BRGM, 160 pp.

- **BOYTON**, R.S., 1980 « Chemistry and technology of lime and limestone.» J. Wiley & Sons, New York, 578 pp.

- **CALCIUM CARBONATE**, 2001 “From the Cretaceous Period into the 21<sup>st</sup> century”.Ouvrage collectif. Edit. F. Wolfgang Tegethoff. In collab. with J., Rouleder and E., Kroker

- **CLAUDE**, J. 1994. "La Chaux- Ses utilisations." Coll. Techno-Nathan- collab. Balthazard et Cotte. Nathan Communication, Paris, 73 pp.
- **DICKSON**, T., **HARBEN**, P., & **LINES**, M., Associate Consultants (2001) "Calcium carbonates" a review of global supply. Copyright-2001- Industrial Minerals Information, London.
- **DUDA**, W.H., 1985. «Cement – data – book.» Band 1 Internationale Verfahrenstechniken der Zementindustrie. Volume 1 – International process engineering in the cement industry (Bilingual edition). Bauverlag GmbH, Wiesbaden, 636 pp.
- **DUDA**, W.H., 1988. «Cement – data – book.» Band 3 – Rohmaterial für die Internationale Zementherstellung. Volume 3 – Raw material for cement production (Bilingual edition). Bauverlag GmbH, Wiesbaden, 192 pp.
- **GALTIER**, L., 1993. "Granulats". Coll. Mémentos roches et minéraux industriels, Rapport BRGM (R 37826), 126 pp. + 3 annexes.
- **GOTTHARDT**, R. & **KASIG**, W. (in Collab. With F. PÖPPELBAUM), 1996. Karbonatgesteine in Deutschland – Rohstoff. Nutzung, Umwelt. Beton-Verlag, Düsseldorf, 420 pp.
- **GUEDRAS**, M & **GUEDRAS**, A., 1957. "La chimie de la dolomie." Eyrolles et Gauthier-Villars, Paris, 90 pp.
- **HARBEN**, P.W., 1992. "The industrial minerals handybook." A guide to markets, specification and prices. Industrial Minerals Division of Metal Bulletin plc, London, 148 pp.
- **HARBEN**, P.W., & **BATES** ,R.L., 1990. "Industrial minerals geology and world deposits." Industrial Minerals Division of Metal Bulletin plc, London, 312 pp.
- **HARBEN**, P.W., & **KUZVART**, M., 1996. "Industrial minerals. A global geology." Industrial Minerals Information Ltd, London, 462 pp.
- **HARRISON**, D.J., 1993. "Industrial minerals laboratory manual-limestone." BGS Technical Report WG/92/29 (Mineralogy and Petrology Series), 45 pp.
- **HAWKINS**, A.B. (Ed.), 1986. "Site investigation practice: assessing BS 5390". Engineering Geology Spec. Publ. N° 2, Geol. Soc. Lond., 423 pp.
- **HUSTRULID**, W. & **KUCHTA**, M., 2006. "Open pit mine planning & design." Vol 1. Fundamentals – Vol 2. CSMine software package and orebody case examples. Taylor & Francis plc / Balkema, London, 971 pp.
- **JACOB**, B., 1961. "La magnésie – cinquième élément majeur de l'alimentation des plantes.» Ed. Dangles, Paris, 243 pp.

- **JOHNSON, R.B., & DEGRAFF, J.V.**, 1988. "Principles of engineering geology." J. Wiley & Sons, New York, 497 pp.
- **KENNEDY, B.A.** (Ed.), 1990. "Surface mining." Soc. For Mining, Metall. & Explor. Inc., Littleton, 1548 pp.
- **KOGEL, J.E., TRIVEDI, N.C., BARKER, J.M. & KRUKOWSKI, S.T.**, (Eds), 2006. "Industrial minerals and rocks." Commodities, markets and uses – 7<sup>th</sup> edition. Soc. For mining, Metallurgy and Exploration, Inc. (SME), Littleton, 1548 pp.
- **LANGBEIN, R., PETER, H. & SCHWAHN, H.-J.**, 1982. "Karbonat und sulfatgesteine." Kalkstein-Dolomit – Magnesit – Gips – anhydrite. Reihe "Nutzbare Gesteine und Industriemineralien" VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 335 pp.
- **LATHAM, J.P.**,(Ed.), 1998. "Advances in aggregates and armourstone evaluation." Geol. Soc. Lond., 201 pp.
- **LIPPMANN, F.**, 1973. "Sedimentary carbonate minerals." Monograph series "Minerals, rocks and inorganic materials", Vol. 6. Springer-Verlag, Berlin, 228 pp.
- **LOCHER, F.W.**, 2006. "Cement." Principles of production and uses. Verlag Bau + Technik GmbH, Dusseldorf, 536 pp.
- **MARTEAU, P.**, 1988. "Les calcaires, craie, marbres et produits dérivés à usage industriel et agricole. » Coll. Mémentos roches et minéraux industriels, Rapport BRGM (88 SGN 355 GEO), 45 pp.
- **MARTEAU, P.**, 1989. « Dolomie, magnésite et produits dérivés à usage industriel et agricole. » Coll. Mémentos roches et minéraux industriels, Rapport BRGM (89 SGN 522 GEO), 33 pp.
- **MENGEL, K. & KIRBY, E.A.**, 1982. "Principles of plant nutrition." Ed. Intern. Potash Institute, Worblaufen-Bern, 655 pp.
- **OATES, J.A.H.**, 1998. "Lime and limestone." Chemistry and technology, production and uses. Wiley-VCH, Weinheim, 455 pp.
- **PAPADAKIS, M. & VENUAT, M.** 1964. "Fabrication et utilisation des liants hydrauliques. » Paris, 312 pp.
- **PATOUREL, L.**, (2009) "Technologie et évolution de l'industrie de la chaux » ; Ciments, Plâtres et chaux- N° 895 ; Février-Mars 2009.
- **PETERS, W.C.**, 1978 « Exploration and mining geology. » J. Wiley & Sons, New York, 696 pp.
- **ROBERT C. FREAS** (1992) "Lime", Industrial minerals and rocks- pp. 589-603.

- **SCHIELE**, E. & **BERENS**, L.W., 1972. « Kalk. » Herstellung – Eigenschaften – Verwendung. Verlag Stahleisen mbH, Düsseldorf, 627 pp.
- **SCOTT**, P.W., & **BRISTOW**, C.M. (Eds.), 2002. “Industrial minerals and extractive industry geology.” Geol. Soc. Lond., 339 pp.
- **SEIDEL**, G., **HUCKAUF**, H. & **STARK**, J., 1980. “Technologie des ciments, chaux, plâtre.” Processus et installations de cuisson. Septima, Paris 230 pp.
- **SMITH**, M.R. & **COLLIS**, L. (Eds), 1993. “Aggregates.” Sand, gravel and crushed rock aggregates for construction purposes. Geol. Soc. Lond., 339 pp.
- **SPENCER**, C.H., 1990. “Matériaux pour ciment.” Coll. Mémentos roches et minéraux industriels, Rapport BRGM (R 31772 GEO SGN 90), 51 pp.
- **TAYLOR**, L. (Ed.), 2003 « Industrial Minerals Directory. » A world guide to producers and processors. Fifth Edition. Metal Books Ltd, Worcester Park, 361 pp.
- **TEGETHOFF**, F.W. (in collab. With J. ROHLEDER & E. KROKER), 2001. “Calcium carbonate: from the Cretaceous Period into the 21<sup>st</sup> century” Birkhäuser Publ., Basel, 342 pp.
- **WHATELEY**, M.K.G & **HARVEY**, P.K. (Eds) 1994. “Mineral resource evaluation II: methods and case histories.” Geol. Soc. Lond., Spec. Publ. N° 79, 271 pp.

## **2: Revues professionnelles et sites web**

- *Aufbereitungs Technik – Mineral Processing.*

Editeur: Bauverlag BV GmbH, GÜTERSLOH. Mensuel.

www.bauverlag.de

- *Cement International – Processing, Performance, Application.*

Editeur: Verlag Bau + Technik GmbH, ERKRATH. Bimestriel.

www.verlagbt.de

- *Ciments – Bétons – Plâtres – Chaux.*

Editeur: Société de l’Industrie Minérale, PARIS. Bimestriel.

www.lasim.org

- *Engineering Geology.*

Editeur: Elsevier Science Publishers, AMSTERDAM. Mensuel.

[www.elsevier.com](http://www.elsevier.com)

- *Engineering & Mining Geology – The Magazine for Mining and Mineral Processing Professionals.*

Editeur: Mining Media, ENGLEWOOD, Colorado. *Mensuel.*

[www.e-mj.com](http://www.e-mj.com) et [www.mining-media.com](http://www.mining-media.com)

- *Global Cement & Lime Magazine.*

Editeur: Pro Publications International Ltd., EPSOM, Surrey. *Mensuel.*

[www.GCLmagazine.com](http://www.GCLmagazine.com) et [www.propubs.com](http://www.propubs.com)

- *GLP – The international Journal for Gypsum, Lime & Building Products.*

Editeur: Tradeship Publications Ltd., DORKING, Surrey. *Mensuel.*

[www.glp-online.com](http://www.glp-online.com)

- *Industrial Minerals.*

Editeur: Industrial Minerals Information Ltd., LONDON. *Mensuel.*

[www.indmin.com](http://www.indmin.com)

- *Mines et carrières – Revue de l'Industrie Minérale, Fr.*

Editeur: Société de l'Industrie Minérale, PARIS. *Mensuel.*

[www.lasim.org](http://www.lasim.org)

- *Mining Engineering.*

Editeur: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc., LITTLETON, Colorado. *Mensuel.*

[www.smenet.org](http://www.smenet.org)

- *Mining Magazine.*

Editeur: The Mining Journal Ltd., LONDON. *Mensuel.*

[www.mining-journal.com](http://www.mining-journal.com) et [www.mininginformation.com](http://www.mininginformation.com)

- *Pit and Quarry.*

Editeur: Advanstar Communications Inc., CLEVELAND, Ohio. *Mensuel.*

[www.pitandquarry.com](http://www.pitandquarry.com)

- *Quarry Management.*

[incorporant depuis la mi-2009 le mensuel *Mining, Quarrying & Recycling* (anciennement *Mine & Quarry*) – *Official magazine of the Minerals Engineering Society*].

Editeur: QMJ Publishing Ltd. NOTTINGHAM. *Mensuel.*

[www.Agg-net.com](http://www.Agg-net.com)

- *Rock Products.*

Editeur: Primedia Business Magazines & Media Inc., OVERLAND PARK, Kansas. *Mensuel*

[www.rockproducts.com](http://www.rockproducts.com)

- *Steinbruch und sandgrube.*

Editeur: Verlagsgesellschaft Grüter GmbH & Co. KG, HANNOVER. *Mensuel.*

[www. Steinbruch-sandgrube.de](http://www.Steinbruch-sandgrube.de)

- *World cement.*

Editeur: Palladium Publications Ltd., FARNHAM, Surrey. *Mensuel.*

[www.worldcement.com](http://www.worldcement.com)

- *World Ceramics & Refractories – Incorporating EuroClay and the Refractory Journal.*

Editeur: London & Sceffield Publishing Co. Ltd., LONDON. *Bimestriel.*

- *World of Mining – Surface & Underground* (anciennement *Surface Mining. Braunkohle & Other Minerals*).

Editeur: GDMB Gesellschaft für Bergbau, Metallurgie, Rohstoff- und Umwelttechnik e.V., CLAUSTHAL-ZELLERFELD. *Bimestriel.*

[www.GDMB.de](http://www.GDMB.de)

- *Zement-Kalk-Gips International (Cement-Lime-Gypsum).*

Editeur: Bauvelarg BV GmbH, GÜTERSLOH. *Mensuel.*

[www. Bauvelarg.de](http://www.Bauvelarg.de)

<http://environnement.wallonie.be/publi/dppgss/carrieres.pdf>

**3 : Brochures et articles spécialisés**

- **Anonymous**, 1972. Calcium Carbonate : 1. Natural chalk whiting ; ground limestone ; and precipitate calcium carbonate. Industrial Minerals, N° 54 (03/1972), pp.9-17.
- **Anonymous**, 1976. Dolomite : 1. The producers. Industrial Minerals, N°101 (02/1976), pp. 15-28.
- **Anonymous**, 1987. Limestone and Dolomite – More than just a flux. “Industrial Minerals” Glass & Ceramics Survey 1987, pp 109-114.
- **Anonymous**, 2003 (in coop. with H. **MERKER** of Refratechnik Cement GmbH). Marktveränderungen in der Kalkindustrie – Market changes in the lime industry. Zement-Kalk-Gips International, N° 6/2003; pp.16-19.
- **BENBOW**, J., 1989. Belgium – An industry profile. Industrial Minerals, N° 260 (05/1989), pp. 23-41.
- **C.R.A.E.C.**, 2010. Les carrières en Wallonie – un monde à redécouvrir. Direction Générale Opérationnelle de l’Agriculture, des ressources Naturelles et de l’Environnement (Service Public de Wallonie), 127 pp. Fichier de 18.15 Mb téléchargeable sur :
- **DICKSON**, T., **HARBEN**, P. & **LINES**, M., 2001. Calcium carbonate. A review of global supply. Materials Markets consulting (Industrial Minerals Information) London, 124pp.
- **GILLOTT**, J.E., 1975. Alkali-aggregate reactions in concrete. Engineering Geology, v. 9, pp. 303-326.
- **HARDER**, J., 2007. Marktanforderungen und trends in der Kalkindustrie – Market demands and trend sin the lime industry. Zement-Kalk-Gips International, N° 11/2007, pp. 45-55.
- **MOORE**, P., 2002. Dolomite value reflected in flat glass. Industrial Minerals, N) 422 (11/2002), pp.22-32.
- **O’DRISCOLL**, M., 1988. Burnt lime / dolime. Seeking markets green. Industrial Minerals, N° 248 (05/1988), pp. 23-51.
- **O’DRISCOLL**, M., 1988. Dolomite – More than crushed stone. Industrial Minerals, N° 252 (09/1988), pp. 37-63.
- **O’DRISCOLL**, M., 1990. Fine carbonate fillers- PCC breaks ground in paper. Industrial Minerals. N° 276 (09/1990), pp. 21-43.
- **OPPERMANN**, B., **MEHLMANN**, M. & **PESCHEN**, N., 1991 Produkte Kalkindustrie für den umweltschutz. (Products from the lime industry for environmental protection).

Zement-Kalk-Gips, N°6/1991, pp. 265-270. (English translation in N° 8/1991 – Edition B, pp. 159-162).

- **POTY, E. & CHEVALIER, E.**, 2004. L'activité extractive en Wallonie - Situation actuelle et perspectives. Direction Générale de l'Aménagement du territoire, du Logement et du Patrimoine (Ministère de la région Wallonne), 85 pp.
- **SMITH, M.**, 1983. Dolomite – steel upturn casts ray of hope. Industrial Minerals. N° 190 (07/1983), pp. 21-40.
- **VALENCHON, P.**, (Ed), 2004. Les calcaires et leurs applications. Les Techniques dans l'Industrie Minérale. N° 22, 1ère partie (07/2004), pp.1-48.
- **WHITELEY, P.G.**, 1991. Refractories – the next decade. Industrial Minerals. N° 288 (09/1991), pp27-43.

#### **4)- Brochures de producteurs**

- Groupe LHOIST (HQ, Limelette)
  - + Au service de l'industrie et de l'environnement (brochure de présentation du groupe, version 1991).
  - + Leader en chaux et dolomie (brochure de présentation du groupe, version 2000).
  - + Experts en chaux, dolomie et réfractaires (brochure de présentation du groupe, version ca. 2001).
  - + Experts en chaux et dolomie (feuillet de présentation du groupe, version 07/2005).
- + LHOIST, Recherche et Développement (2007), « Tests de calcination » Rapport inédit.
- + Lhoist (brochure de présentation du groupe, version 2006).
- + Balthazard et Cotte. Leader of the lime industry in France
- + The use of lime in environmental applications.
- + Lime and Steel. Expertise at the service of steelmakers.
- + L'ABC du chaulage. La lutte contre l'acidité des sols.
- + La chaux. Syndicat National des Fabricants de Ciment et de Chaux. Paris

## 5)- Documentation et Webographie additive

### ➤ OUVRAGES :

– **ACHOUCHE, W., BEKHOUCHE, I., et HARIECHE, H., 1998.** Etude géologique de la région de Bou Nouara : approche sédimentologique et structurale. Mém. Ing. Géol. Struct. Inst. Sci.de la Terre(IST)- Univ. Constantine. 73p.

- **ARIS, Y., 1994.** Etude tectonique et microtectonique des séries jurassiques à plio-quadernaires du constantinois central (Algérie Nord - Orientale). Caractérisation des différentes phases de déformation. Thèse de doct. Nancy I- France, 215 p.

-- **BAR, C. B., 1957.** Carte géologique, feuille d'Aïn M'lila n° 120, 1/50000 avec notice explicative ; Pub. Service de la Carte Géologique d'Algérie.

- **BOUREZG, M. et KOLLI, O., 2011-** Dolomie et chaux dolomitique du massif de Téioualt (Aïn M'lila, sud-constantinois, Algérie) ; revue Geomagheb n°7, 2011, Fès, Maroc. pp.1-11 ;

– **BOUREZG, M. et KOLLI, O., 2013-**Calcaire et chaux, la carrière du Khroub (Algérie nord-orientale), un exemple d'application. Bulletin du service géologique national-Alger .Vol. 24 n°1, pp.41-57, 13 fig., 5 tab.

- **BOUILLIN, J.P. 1986.** Le « bassin maghrébin » : une ancienne limite entre l'Europe et l'Afrique à l'ouest des Alpes. Bull. Soc. Géol. France, 8(2) 547-558.

- **BOULARAK-M. (2003).** Contribution à l'étude hydrogéologique du sous bassin de Bou Merzoug. Vulnérabilité des eaux souterraines et impact de la pollution sur la région du Khroub. Thèse de magist, FSTATG, Dpt. Sc. De la Terre. Univ. Constantine. .pp

– **BOUMARAF, N. et LAROUS, R., 2000.** Contribution à l'étude géologique et minière du gisement de dolomite du djebel Téioualt. Mémoire ingénieur ; Inst. Sci.de la Terre, université Mentouri-Constantine, inédit, 81p.

- **CLAUDE, J., 1994.** La chaux, ses utilisations. Balthazar et Cotte (Groupe Lhoist)-Tech. Nathan- France. 73p.

- **COIFFAIT, P.E., QUINIF Y. et VILA, J.M., 1975.** Karstification des massifs néritiques constantinois (Algérie). Annales de spéléologie, t.30, 4 : CNRS, fr- 619-627.

- **DELEAU-P. ; 1937.** Notice explicative de la carte géologique (n°32) au 1/50000 de Azzaba (ex Jemapps). Service de la carte géologique d'Algérie (SCGA) Alger.

- **DURAND-DELGA**, M. 1969. Mise au point sur la structure du Nord-Est de la Berbérie. Publ. Serv. Géol. Algérie, n°39, 89-131.
- **DURAND-DELGA**, M., **RAOULT**, J.F. et **VILA** -J.M. 1969. Situation en fenêtre du secondaire du djebel Safia (Nord du Constantinois, Algérie).
- **DURAND-DELGA** M. et **FONTBOTE** M. 1980 Cadre structural de la Méditerranée occidentale. 26<sup>e</sup> congrès international de géologie ; Paris. In Mémoires du BRGM n° 115, Orléans, pp. 67-85.
- **FARAH**, A.S., 1991. Etude du comportement hydro-chimique d'un oued en zone méditerranéenne semi aride d'Afrique du Nord et de ses causes naturelles et anthropiques : l'Oued Rhumel, Constantinois Algérie. Thèse de Doctorat. Université d'Orléans. France. 273p.
- **GUIRAUD**, R., 1973. L'évolution post triasique de l'avant pays de la chaîne alpine en Algérie d'après l'étude du bassin du Hodna et des régions voisines. Thèse Sci. Univ. de Nice, 114 fig., 12 pl. h.t., 270p.
- **HARDER**, J., 2007. Market demands and trends in the lime industry. Market review, ZKG International, n° 11-2007. Vol. 60. Pp.45-65.
- **HERRIER**, G., **PELLETIER**, M. et **PUIATTI**, D., 2010. Chaux aérienne. Contexte, fabrication, domaines applicatifs. Collection Techniques de l'ingénieur, C-923, France : 1-18.
- **LAUWERS**, A., 1983 ; 2011. La dolomie, son extraction, ses traitements industriels et ses utilisations. Géologue, Groupe Lhoist, coordination Center B-1342. Limelette, Belgique.
- **LAHONDERE**, J.C., 1987. Les séries ultra telliennes d'Algérie nord orientale et les formations environnantes dans leur cadre structural. Th. Doc.D'état-Sc. Nat.Univ. P. Sabatier-Toulouse. 242p.
- **MARMI**, R. et **GUIRAUD**, R., 2006. End Cretaceous to recent polyphased compressive tectonics along the "Môle Constantinois" and foreland (NE Algeria). Journal of African Earth Science, 45: 123-136.
- **NACER**, W., 2005. Etude des formations carbonatées du versant sud du massif de l'Oum Settas : Approche quantitative et qualitative. Thèse de Magister. FSTGAT ? Univ. Mentouri-Constantine., pp.148.
- **PURSER-B.H.** ; 1972 « Subdivision et interprétation des séquences carbonatées. » Mémoire. du BRGM n°77, Fr. pp 680-698
- **RAOULT**, J.F. 1974. Géologie du centre de la chaîne numidique (Nord constantinois, Algérie). Mémoire n°121- Soc. Géol. de France, Nouv.Sér. T.L III- 1.

- **SCHROEDER, R., GUELLAL, S. et VILA, J.M.**, 1975. Parurgonina caelinensis Cuvillier, Foury et Pignatti Morano 1968 dans le Malm du Djebel TEIOUALT (Constantinois, Algérie). *Ecloga geol. Helvetic*, 68/2: 319-326.
- **VILA, J.M. et SIGAL, J.** 1969. Précisions sur les termes les plus récents de la série du djebel Safia (Nord constantinois- Algérie). C.R. Acad.Sci.Paris- t 268, p.1461-1464.
- **VILA-J.M. et Al.** ; 1977 « Carte et Notice explicative de la carte géologique au 1/200 000 Constantine PQ3-4. » Première édition, Serv. De le Carte Géol. D'Algérie et Sonatrach- (Etablissement et rédaction collectifs).
- **VILA, J.M.**, 1978. Définition de la nappe néritique constantinoise, élément structural majeur de la chaîne alpine d'Algérie nord orientale. *Bulletin. société. géologique de France*, 20, 5: 791-794.
- **VILA, J.M.**, 1980. La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins algéro tunisiens. Thèse. Doctorat.es-Sciences. Université. P. et M. Curie- Paris VI, 2 vol., 665 p.
- **WILDI, W.**, 1983. La chaîne tello rifaine (Algérie, Maroc, Tunisie) : structure, stratigraphie et évolution du Trias au Miocène. *Revue. Géol. Dyn. Géograph. Phys.*, (24), 3, pp 201-297.

➤ **PROSPECTUS DE FIRMES :**

- **LHOIST-SA-1992, 2006.** Brochures et Prospectus : Les utilisations de la chaux –La chaux, fabrication, usages- La chaux dans l'épuration des eaux – La chaux dans le traitement des gaz de fumées – La chaux dans la stabilisation et la valorisation des boues... Groupe Lhoist, coordination Center B-1342. Limelette, Belgique.
- **ORGM**, Livrets des substances non métalliques de l'Algérie (1997-2000), un livret par wilaya : Cas des wilayas d'Oum El Bouaghi, de Skikda et de Constantine. Edition du Service géologique d'Algérie, Boumerdès, Algérie. Abed A., 1998 Oum El Bouaghi, 1004. P.36.
- **PERRIER, R.** ; (1993) « Les roches calcaires de France », *Mines et Carrières*, La pierre en France, Les Techniques, II-III, 1993, p.54-69.
- **RAVEN, Th.**, 1957. Carte et notice explicative de la carte géologique au 1/50000 du Khroub » n° 97-Publication du Serv. De la Carte Géol. D'Algérie.
- **La chaux.** Syndicat National des fabricants de ciments et de chaux, Paris, France.
- **SONAREM (1976-1977).** Résultats des travaux de prospection réalisés sur le gisement de dolomies de Dj. TEIOUALT. Rapport interne. Inédit, 31p.

- Rapport de l'ENDMC (Ent. Nat. Des Mat.de Construction). 1991 - Unité de recherche et Etudes Géol. « Projet poudre de carbonate de calcium d'El Khroub » Boumerdès. Inédit.
- SNMC (société nationale des matériaux de construction)-DREG 1977. Projet agrégats Ben Azzouz- Recherches préliminaires. Boumerdès. Inédit.
- E.N.G., (Entreprise nationale des granulats.), Rapport préliminaire : Omraci [2001] « Exploitation qualitative du gisement de carbonate de calcium d'El Khroub-Constantine ». Alger. Inédit.
- ENDMC (Ent.Nat.Des Mat. De Construc.) – unité de recherche et études géol. (1991). Rapport sur le «Projet poudre de carbonate de calcium d'El Khroub.»Boumerdès. Inédit.
- SVERIDOV (1979) « Rapport sur l'exploitation du gisement d'agrégats d'El khroub ». Premier stade- notice explicative- Archives du service des mines - Constantine. Inédit.
- Constantine Carte géologique au 1/200000. 1977. Edition Sonatrach
- Le Khroub Cartes Topographiques ;, feuilles au 1/25000 , Edition du Service Géologique d'Algérie, Boumerdès.
- Azzaba Cartes topographiques (ex Jemappes), coupures au 1/25000.

➤ **WEBOGRAPHIE :**

- [www.ecole-avignon.com](http://www.ecole-avignon.com),
- [www.ocres-chaux.fr/chaus.shtml](http://www.ocres-chaux.fr/chaus.shtml),
- [www.fr.ekopedia.com/chaux](http://www.fr.ekopedia.com/chaux),
- [www.dz.undp.org/projets\\_coopération/documentation\\_support/ksours/guide\\_chaux.pdf](http://www.dz.undp.org/projets_coopération/documentation_support/ksours/guide_chaux.pdf)
- [www.mem.algeria.org/français/index.php](http://www.mem.algeria.org/français/index.php).
- [www.eng.dz](http://www.eng.dz)
- [www.ac-reims.fr](http://www.ac-reims.fr) (Giles Fronteau-2000)
- [www.maerz.com](http://www.maerz.com)

- [www.carmeuse.com](http://www.carmeuse.com)
- [www.ihs.com/products/chemical/lime.aspx](http://www.ihs.com/products/chemical/lime.aspx)
- [www.ulg.ac.be.F.Boulvain/sédimentologie](http://www.ulg.ac.be/F.Boulvain/sédimentologie);
- [www.terdici.com/pratiques-proprietes.html](http://www.terdici.com/pratiques-proprietes.html),
- [www.lesateliersdiverone.com/questions\\_chaux](http://www.lesateliersdiverone.com/questions_chaux),
- [www.Variance.free.fr/chaux/melange/chaux.html](http://www.Variance.free.fr/chaux/melange/chaux.html),
- [www.Aida.ineris.fr/bref/bref\\_ciment/site/pages](http://www.Aida.ineris.fr/bref/bref_ciment/site/pages),
- [www.Wikipedia.org/wiki/chaux\\_chimie](http://www.Wikipedia.org/wiki/chaux_chimie) = la chaux vive,
- [www.fr.wikipedia.com/chaux](http://www.fr.wikipedia.com/chaux),
- [www.graymont.com/technical/NRCan\\_Lime\\_Commodity\\_Review\\_Fr.pdf](http://www.graymont.com/technical/NRCan_Lime_Commodity_Review_Fr.pdf).
- [www.u-picardie.fr/beauchamp](http://www.u-picardie.fr/beauchamp)
- [www.ineris.fr/ipcc/sites/default/files/clm.bref\\_0510-VF-pdf](http://www.ineris.fr/ipcc/sites/default/files/clm.bref_0510-VF-pdf)
- [www.la.ref.org/matériaux](http://www.la.ref.org/matériaux)
- [www.cemex.fr.wikipedia](http://www.cemex.fr.wikipedia)
- [www.Brgm/RP\\_50806.fr](http://www.Brgm/RP_50806.fr) (par COUMOUL A.; (2000) « Carbonates calciques et magnésiens et produits dérivés à usage industriel et agricole » Mémento roches et minéraux industriels. 144p.
- [www.us Geological Survey- lime](http://www.us Geological Survey- lime).
- [www.graymont.com/technical/NRCan\\_Lime\\_Commodity\\_Review\\_Fr.pdf](http://www.graymont.com/technical/NRCan_Lime_Commodity_Review_Fr.pdf).
- [www.cemex.fr.wikipédia-granulats...](http://www.cemex.fr.wikipédia-granulats...)
- [www.upicardie.fr/beauchamp/](http://www.upicardie.fr/beauchamp/)
- [www.ulg.ac.be/geolsed/sedim/sedimentologie.htm](http://www.ulg.ac.be/geolsed/sedim/sedimentologie.htm)- J.Boulvain (2010)
- [www.annales.org/archives/cofrhiges/dolomie](http://www.annales.org/archives/cofrhiges/dolomie)
- [www.societe chimique de France.fr/carbonate de calcium](http://www.societe chimique de France.fr/carbonate de calcium)
- [www.romuald babou,2010.u.laval.canada](http://www.romuald babou,2010.u.laval.canada)
- [www.usgs. Mineral industry survey.dir.2010](http://www.usgs. Mineral industry survey.dir.2010)
- [www.lhoist-chaux-plan-sectoriel.pdf](http://www.lhoist-chaux-plan-sectoriel.pdf)

- [www.LimeManufacturing IP.pdf](#)
- [www.lime-essential-chemical.pdf](#)
- [www. mcgroup.co.uk/researches/lime](#)
- [www.les géomatériaux en region centre. le tuffeau.mht](#)
- [www.code de bonne pratique pour traitement des sols à la chaux.pdf](#)
- [www.gallois\\_2010these dolom.pdf](#)
- [www. histoire et utilisation de la chaux\\_files](#)
- [www.calcaire-2.pdf](#)
- [www.dolomie paris.thèse.pdf](#)
- [www.gadiri@2009-28-09 Tlemcen](#) : les différents types de normes granulats.
  
- **FICHIERS PDF** : broyage calcaire.j3053 ; C.902 ; chaux esp.C.923 ; chaux C.924 : pierres et calc.402 ; esp.-m7040...in Collection *Techniques de l'Ingénieur* :

### **LOGICIEL**

- Logiciel STATISTICA-Version 6.1 (1984-2002) copyright stat soft, Inc.

## ANNEXES -A-

**A.1-Description macroscopiques des échantillons de l'Ooum Settas prélevés « banc par banc »**

Du NNE vers le SSO, 59 échantillons ont été prélevés et décrits à la loupe. Les intervalles de prélèvement figurent dans le *tableau 9.21 à l'appui de la figure 9.20.*

- **AG 54** : est un calcaire gris assez foncé, à grain fin, à fentes recristallisées, montrant de rares pores et des fossiles type milioles.
- **AG 55** : est un calcaire gris moyen, à grain fin, fentes recristallisées avec traces d'oxydation, contenant quelques pores et des fossiles (milioles, bisériés et débris non identifiés).
- **AG 56** : est un calcaire gris, à grain fin, avec fentes recristallisées et traces d'oxydation ; quelques pores et de nombreux fossiles (milioles, orbitolines...).
- **AG 57** : est un calcaire gris foncé, à grain fin, à fentes recristallisées, montrant de rares pores et de nombreux fossiles type milioles.
- **AG 58** : est un calcaire gris, à grain fin à moyen, avec fentes recristallisées et traces d'oxydation ; la partie à grain moyen est plus riche en fossiles (milioles et débris).
- **AG 59** : est un calcaire gris foncé, à grain fin, à fentes recristallisées avec quelques traces d'oxydation, et des fossiles type milioles.
- **AG 60** : est un calcaire gris, à grain fin, avec fentes recristallisées et traces d'oxydation, riche en fossiles (milioles et débris).
- **AG 61** : est un calcaire gris foncé, à grain fin, riche en fossiles (milioles, bisériés et débris non identifiés).
- **AG 62** : est un calcaire gris foncé, à grain fin, avec traces d'oxydation, riche en fossiles (milioles et débris).
- **AG 63** : est un calcaire gris assez foncé, à grain fin, avec micro pores et cristaux translucides, montrant peu de fossiles.
- **AG 64**: est un calcaire gris assez foncé, avec fentes recristallisées en calcite, quelques pores et peu de fossiles.
- **AG 65**: est un calcaire gris, à grain fin, montrant des joints stylolitiques avec ramifications, oxydation, une faible porosité ; il est riche en fossiles (milioles et débris).
- **AG 66**: est un calcaire gris assez foncé, à grain fin, avec fentes recristallisées, il montre un aspect pâteux (granulaire à cristallin), quelques traces d'oxydation et la présence de nombreux fossiles (filiformes, arrondis de couleur miel variant du brun au blanc et de type milioles).
- **AG 67**: est un calcaire gris foncé, à grain fin, avec fentes recristallisées perpendiculaires à la stratification, quelques traces d'oxydation. Présence de surfaces d'érosion (surfaces arrondies) et des fossiles : filiformes, arrondis de couleur miel et de rares milioles.
- **AG 68** : est un calcaire gris foncé, à grain fin, à fentes plus ou moins recristallisées, avec traces d'oxydation, riche en fossiles (milioles, débris et macro fossiles). Présence de surfaces arrondies.
- **AG 69** : se subdivise en deux parties :

- **AG 69a** : est un calcaire gris foncé, à grain fin à moyen, avec fentes recristallisées, riche en fossiles (milioles, débris et macro fossiles), odeur fétide à la cassure.
- **AG 69b** : est un calcaire gris foncé, à grain fin, à fentes plus ou moins recristallisées, avec traces d'oxydation, contient des fossiles (milioles, débris et des macro fossiles).
- **AG 70** : est un calcaire gris foncé, à grain fin, à fentes plus ou moins recristallisées, avec traces d'oxydation contient des fossiles (milioles, débris et filiformes, arrondis)
- **AG 71** : est un calcaire gris foncé, à grain fin, à fentes plus ou moins recristallisées, avec traces d'oxydation. Présence de nodules ferrugineux. Il est traversé par une surface stylolitique. Quelques fossiles.
- **AG 72**: est un calcaire gris foncé, à grain moyen à grossier avec traces d'oxydation, contient des fossiles et une tache foncée à reflets ( ? ) ; odeur fétide à la cassure.
- **AG 73**: est un calcaire gris foncé, à grain fin ; il montre un aspect pâteux, de rares fentes recristallisées et des traces d'oxydation. contient des fossiles (milioles, débris et: filiformes, arrondis...). Odeur fétide à la cassure.
- **AG 74**: est un calcaire gris, à grain fin, il contient des pores superficiels avec traces d'oxydation et de nombreux fossiles (milioles et débris indistincts).
- **AG 75**: est un calcaire gris foncé, à grain fin, à fentes recristallisées et des fossiles variés (milioles, débris et: filiformes, arrondis miel...et cristaux en forme de fossiles ( ?)).
- **AG 76**: est un calcaire gris, à grain moyen avec de rares traces d'oxydation, riche en fossiles (milioles, débris, filiformes et arrondis de teinte miel).
- **AG 77**: à la base du banc: c'est un calcaire gris clair, à grain fin à moyen, à rares fentes recristallisées et traces d'oxydation, riche en fossiles (milioles parfois perforés et filiformes bruns).
- **AG 78**: au sommet du banc : c'est un calcaire gris , à grain fin à moyen, à fentes en lignes brisées rappelant des jointes stylolitiques, présence de fossiles (milioles, débris, filiformes et arrondis de teinte miel), odeur à la cassure.
- **AG 79**: est un calcaire gris, à grain très fin qui montre un aspect pâteux ; présence de fossiles (milioles, débris de macro fossiles : huîtres?).
- **AG 80**: est un calcaire gris, à grain fin qui montre un aspect pâteux et des traces de clivage (zone clair/zone sombre). Présence de jointes stylolitiques avec parfois recristallisation en calcite blanche, riche en fossiles (milioles parfois perforés et débris indistincts).
- **AG 81**: est un calcaire gris, à grain fin qui montre un aspect pâteux ; traces d'oxydation, riche en fossiles (milioles, débris, empreintes filiformes, courbes et arrondis parfois avec cils), odeur à la cassure.
- **AG 82**: est un calcaire gris, à grain fin avec fentes recristallisées et traces d'oxydation, présence de fossiles (milioles, débris et empreintes brunes filiformes).
- **AG 83**: est un calcaire gris assez foncé, à grain fin à moyen, avec des fentes recristallisées et traces d'oxydation ocre, poreux, riche en fossiles (milioles, empreintes brunes à miel filiformes et gros débris d'huîtres), odeur à la cassure.
- **AG 84**: est un calcaire gris foncé, à grain fin avec fentes recristallisées et traces d'oxydation, riche en fossiles (idem que B-30 odeur à la cassure).
- **AG 85** : est un calcaire gris foncé, à grain fin avec fentes irrégulières recristallisées et riche en fossiles (rares milioles, des empreintes brunes). Présence des concrétions ferrugineuses en surface (goethite).

- **AG 86:** est un calcaire gris, à grain très fin avec fentes recristallisées, riche en fossiles (milioles, des empreintes brunes longiformes ou à contours flous d'apparence cristalline).
- **AG 87:** est un calcaire gris, à grain fin avec de rares traces d'oxydation, riche en fossiles (milioles, débris et empreintes brunes-miel).
- **AG 88:** est un calcaire gris, à grain fin qui montre un aspect pâteux ; avec fentes recristallisées, riche en fossiles (milioles, empreintes longiformes brunes-miel et macro fossile en anneau?).
- **AG 89:** est un calcaire gris, à grain fin qui montre un aspect pâteux ; avec quelques fentes recristallisées, une oxydation diffuse et de nombreux fossiles (milioles, empreintes longiformes brunes-miel).
- **AG 90:** est un calcaire gris, à grain fin qui montre un aspect pâteux beige ; des traces d'oxydation, riche en fossiles (rares milioles, des empreintes longiformes brunes-miel).
- **AG 91:** est un calcaire gris, à grain fin qui montre un aspect pâteux beige ; avec fentes plus ou moins larges. Il n y a pas de fossiles, présence de zones de broyage.
- **AG 92:** est un calcaire gris, à grain très fin qui montre un aspect pâteux; riche en fossiles (milioles, empreintes longiformes et arrondis brunes-miel et des débris pluri cm de valves d'huîtres).
- **AG 93:** est un calcaire gris, à grain moyen qui montre un aspect pâteux ; avec quelques fentes recristallisées plus ou moins larges et de nombreux fossiles (milioles, et débris pluri cm blanchâtre de valves d'huîtres).
- **AG 94:** est un calcaire gris, à grain fin, avec des fentes recristallisées et traces d'oxydation, riche en fossiles (milioles, débris et empreintes brunes-miel).
- **AG 95:** est un calcaire à grain moyen, à texture granulaire montrant des grains équivalents jointifs de milioles ; il est parfois d'aspect pâteux et présente quelques fentes recristallisées, contient des fossiles (milioles, débris indistincts).
- **AG 96:** est un calcaire gris, à grain fin avec fentes recristallisées, l'une d'elles, irrégulière indique la trace d'un joint stylolitique, contient des fossiles (milioles, débris indistincts).
- **AG 97:** est un calcaire gris, qui montre un aspect pâteux, contient de nombreux fossiles (milioles et empreintes longiformes et arrondies brunes-miel à blanches apparaissant quelquefois en rubans).
- **AG 98:** est un calcaire gris, à grain fin qui montre un aspect pâteux, avec fentes recristallisées multi directionnelles, de rares traces d'oxydation, riche en fossiles (milioles, empreintes longiformes et arrondis brunes-miel à blanc).
- **AG 99 :** est un calcaire gris, cristallin à micro cristallin, quelques pores contenant de rares traces d'oxydation et présence de fossiles (fragments d'huîtres et débris indistincts).
- **AG 100:** est un calcaire gris, cristallin identique à B-46, avec un contenu en fossiles équivalent.
- **AG 101 :** est un calcaire gris, à grain fin montrant une transition entre un calcaire cristallin et un autre pâteux. Ce dernier contient de rares traces d'oxydation et présente des fossiles (milioles et débris indistincts).
- **AG 102:** est un calcaire gris, à grain fin qui montre un aspect pâteux beige, avec fentes recristallisées, de rares traces d'oxydation, riche en fossiles (milioles et empreintes longiformes et arrondis brunes-miel à blanc).

- **AG 103:** est un calcaire gris, à grain fin qui montre un aspect pâteux, avec fentes recristallisées multi directionnelles et quelques fossiles (milioles et débris indistincts). Présence de surface durcie légèrement ferrugineuse.
- **AG 104:** est un calcaire gris, qui montre un aspect pâteux beige, avec fentes recristallisées, traces d'oxydation et présence de fossiles (milioles et débris indistincts).
- **AG 105:** est un calcaire gris, qui montre un aspect pâteux beige, avec fentes recristallisées, traces d'oxydation et présence de fossiles (milioles et empreintes longiformes et arrondis brunes-miel à blanc).
- **AG 106:** est un calcaire gris montrant quelques pores parfois tapissés de cristaux fin. Des empreintes de milioles jointives donnent un aspect granulaire identique à B-42. Présence de fossiles (arrondis et longiformes brunes-miel à blanc, ces derniers sont quelquefois rubanés).
- **AG 107:** est un calcaire gris, qui montre un aspect pâteux beige, avec fentes recristallisées, traces d'oxydation et présence de fossiles (milioles, empreintes longiformes et arrondis brunes-miel à blanc et des débris de valves d'huîtres).
- **AG 108:** est un calcaire gris, qui montre un aspect pâteux beige, avec fentes recristallisées et des fossiles (empreintes longiformes et arrondis brunes-miel à blanc, autres empreintes spongieuses et des débris de macro fossiles à contours flous : valves d'huîtres ?)
- **AG 109:** est un calcaire gris, avec fentes recristallisées, traces d'oxydation et présence de fossiles (milioles, empreintes longiformes et arrondis brunes-miel à blanc, autres empreintes spongieuses et des débris de valves d'huîtres).
- **AG 110:** est un calcaire gris, d'aspect granulaire, avec fentes recristallisées, de rares pores et présence de fossiles (milioles et empreintes spongieuses). Il ressemble à B-56.
- **AG 111:** est un calcaire gris clair, d'aspect granulaire, avec de rares traces d'oxydation et peu de fossiles ( les empreintes longiformes et arrondis brunes-miel à blanc deviennent presque indistinctes, le blanc y domine).
- **AG 112 :** est un calcaire gris clair, d'aspect granulaire, contenant des fossiles (milioles, débris indistincts et empreintes arrondis et longiformes blanc et miel; parfois ces derniers sont rubanés).

## A.2.- ANALYSES CHIMIQUES OUM SETTAS (Laboratoire LHOIST. 2007-2008).

### ✓ A.2-1- ANALYSES 47 observations, 18 variables

Sample number	CaO	Mg O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	S	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	PF	BaO	SrO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Pb	Zn	Ni	V	TiO <sub>2</sub>
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
O.S.001	55,49	0,31	0,01	0,002	0,05	0,01	0,0016	43,94	0,0001	0,0119	0,004	0,0021	0,0007	0,0006	0,005	0,00076	0,0003	0,001
O.S.002	55,67	0,16	0,01	0,002	0,05	0,01	0,0012	43,92	0,0001	0,0134	0,0066	0,0029	0,0007	0,0006	0,0031	0,0006	0,00064	0,0012
O.S.003	55,16	0,37	0,05	0,01	0,33	0,14	0,0019	43,74	0,0001	0,0299	0,0118	0,0182	0,0301	0,00077	0,0055	0,0006	0,0018	0,0061
O.S.004	55,68	0,14	0,01	0,003	0,05	0,01	0,001	43,9	0,0001	0,0149	0,0056	0,0083	0,0023	0,0006	0,0027	0,00077	0,00038	0,0018

CALCAIRES, DOLOMIES ET CHAUX

O.S.005	55,06	0,43	0,06	0,011	0,36	0,15	0,0021	43,73	0,0001	0,0284	0,0146	0,017	0,0321	0,0006	0,0053	0,00074	0,0033	0,0062
O.S.006	55,35	0,37	0,02	0,008	0,12	0,04	0,0027	43,89	0,0003	0,0171	0,0036	0,0042	0,0085	0,00089	0,0028	0,0008	0,00094	0,0033
O.S.007	55,32	0,37	0,03	0,008	0,15	0,05	0,0024	43,87	0,0002	0,0167	0,0039	0,0044	0,0115	0,0014	0,0056	0,00064	0,0011	0,0026
O.S.008	54,62	0,62	0,09	0,01	0,69	0,17	0,0022	43,6	0,0004	0,0293	0,0034	0,0093	0,0423	0,0006	0,0046	0,00121	0,0015	0,0078
O.S.009	55,57	0,24	0,01	0,006	0,05	0,01	0,001	43,93	0,0001	0,0189	0,0025	0,0055	0,0007	0,0006	0,0034	0,0006	0,00043	0,0015
O.S.010	55,72	0,12	0,01	0,005	0,05	0,01	0,0013	43,91	0,0001	0,0073	0,0046	0,0019	0,0007	0,0006	0,013	0,0011	0,0003	0,0009
O.S.011	55,73	0,11	0,01	0,002	0,05	0,01	0,0016	43,91	0,0002	0,0074	0,0115	0,0016	0,0007	0,0006	0,0025	0,00066	0,00049	0,0008
O.S.012	55,69	0,14	0,01	0,003	0,05	0,01	0,0016	43,91	0,0002	0,0096	0,0082	0,0054	0,0013	0,0006	0,0037	0,00097	0,00082	0,0009
O.S.013	55,65	0,16	0,02	0,006	0,06	0,01	0,0011	43,9	0,0001	0,0171	0,007	0,0089	0,003	0,0006	0,0032	0,0006	0,00073	0,0013
O.S.014	55,66	0,16	0,01	0,007	0,05	0,01	0,001	43,91	0,0001	0,0097	0,0027	0,0032	0,0018	0,0006	0,0038	0,00095	0,00092	0,0009
O.S.015	55,46	0,3	0,02	0,012	0,08	0,02	0,0012	43,91	0,0002	0,0151	0,005	0,0075	0,0053	0,0006	0,0046	0,00124	0,0042	0,0016
O.S.016	54,89	0,64	0,04	0,045	0,26	0,1	0,0012	43,83	0,0004	0,0233	0,0054	0,0189	0,0242	0,0006	0,0027	0,00141	0,0058	0,0052
O.S.017	55,65	0,17	0,01	0,005	0,05	0,01	0,001	43,91	0,0001	0,0129	0,0041	0,0026	0,0013	0,0006	0,004	0,00126	0,00064	0,0012
O.S.018	55,1	0,52	0,07	0,01	0,17	0,06	0,0077	43,87	0,0004	0,021	0,0477	0,0059	0,0173	0,0006	0,0029	0,00061	0,0031	0,004
O.S.019	55,68	0,15	0,01	0,005	0,05	0,01	0,002	43,91	0,0001	0,008	0,006	0,0015	0,0008	0,0006	0,001	0,0017	0,0008	0,0008
O.S.020	55,33	0,38	0,03	0,007	0,13	0,04	0,0022	43,89	0,0002	0,031	0,0029	0,0072	0,0144	0,0006	0,0023	0,0006	0,0013	0,0023
O.S.021	55,66	0,17	0,01	0,006	0,05	0,01	0,0015	43,92	0,0001	0,019	0,0025	0,0048	0,0014	0,0006	0,0037	0,00062	0,0008	0,0008
O.S.022	55,69	0,14	0,01	0,003	0,05	0,01	0,0011	43,91	0,0001	0,011	0,0022	0,0021	0,001	0,0006	0,0042	0,0006	0,0004	0,0008
O.S.023	55,69	0,14	0,01	0,003	0,05	0,01	0,0017	43,91	0,0001	0,012	0,0034	0,0022	0,001	0,0006	0,003	0,00095	0,0003	0,0008
O.S.024	55,75	0,09	0,01	0,002	0,05	0,01	0,0012	43,9	0,0001	0,007	0,0045	0,0013	0,001	0,0006	0,0084	0,00098	0,0004	0,0008
O.S.025	55,68	0,15	0,01	0,003	0,05	0,01	0,0016	43,92	0,0001	0,011	0,0059	0,0029	0,0013	0,0006	0,0033	0,0012	0,0006	0,0008
O.S.026	55,72	0,12	0,01	0,003	0,05	0,01	0,0019	43,91	0,0001	0,008	0,0053	0,0016	0,0008	0,00069	0,0029	0,0016	0,0005	0,0008
O.S.027	55,55	0,21	0,02	0,007	0,11	0,03	0,0021	43,88	0,0002	0,017	0,015	0,007	0,0061	0,0006	0,0024	0,0013	0,0019	0,0013
O.S.028	55,65	0,15	0,02	0,005	0,07	0,02	0,0009	43,89	0,0001	0,016	0,0078	0,0073	0,0032	0,0006	0,0019	0,0006	0,0008	0,0011
O.S.029	55,55	0,16	0,02	0,006	0,18	0,07	0,0013	43,82	0,0002	0,015	0,0074	0,0049	0,014	0,0006	0,0023	0,00097	0,0017	0,0025
O.S.030	55,66	0,15	0,02	0,007	0,05	0,01	0,0012	43,9	0,0003	0,019	0,0083	0,0049	0,0028	0,0006	0,0015	0,0006	0,0006	0,0009
O.S.031	55,72	0,1	0,02	0,005	0,05	0,01	0,0011	43,89	0,0001	0,01	0,0063	0,0044	0,0022	0,0006	0,0018	0,00098	0,0004	0,0008
O.S.032	55,7	0,13	0,01	0,004	0,03	0,01	0,0008	43,91	0,0002	0,01	0,0048	0,0024	0,0008	0,0012	0,0027	0,0006	0,0002	0,0066
O.S.033	55,71	0,11	0,03	0,009	0,03	0,01	0,001	43,9	0,0001	0,012	0,0058	0,0183	0,0009	0,0006	0,0018	0,0006	0,0008	0,006
O.S.034	55,75	0,09	0,01	0,011	0,03	0,01	0,0006	43,9	0,0002	0,097	0,0053	0,014	0,0005	0,0006	0,0013	0,0006	0,0004	0,0074
O.S.035	55,72	0,11	0,02	0,004	0,03	0,01	0,001	43,9	0,0001	0,015	0,0039	0,0044	0,0009	0,0006	0,0016	0,0007	0,0005	0,0043
O.S.036	55,71	0,13	0,01	0,003	0,03	0,01	0,0016	43,91	0,0002	0,009	0,0034	0,0016	0,0006	0,0007	0,0019	0,00062	0,0008	0,0029

CALCAIRES, DOLOMIES ET CHAUX

O.S.037	55,74	0,09	0,01	0,003	0,06	0,01	0,0017	43,89	0,0002	0,008	0,0127	0,0019	0,0015	0,0006	0,0022	0,0015	0,0004	0,0048
O.S.038	55,73	0,1	0,01	0,002	0,05	0,01	0,001	43,9	0,0002	0,009	0,0084	0,0015	0,0012	0,0006	0,0023	0,0007	0,0003	0,0065
O.S.039	55,72	0,1	0,01	0,002	0,06	0,01	0,0009	43,89	0,0004	0,01	0,0064	0,002	0,0015	0,0006	0,0026	0,0007	0,0005	0,0036
O.S.040	55,05	0,57	0,07	0,05	0,14	0,04	0,0016	43,88	0,0003	0,035	0,0074	0,0182	0,0165	0,0007	0,0039	0,00076	0,004	0,0058
O.S.047	55,29	0,29	0,11	0,005	0,25	0,09	0,002	43,76	0,0002	0,0176	0,0088	0,0088	0,0217	0,0006	0,0083	0,0008	0,0012	0,0032
O.S.048	55,15	0,42	0,05	0,016	0,28	0,1	0,002	43,79	0,0002	0,0307	0,0087	0,019	0,026	0,0006	0,0023	0,0011	0,0022	0,0037
O.S.049	55,72	0,1	0,03	0,002	0,05	0,01	0,002	43,89	0,0001	0,0116	0,0057	0,0051	0,0033	0,0006	0,0016	0,0006	0,0004	0,002
O.S.050	55,21	0,41	0,05	0,022	0,21	0,07	0,002	43,83	0,0003	0,0269	0,0084	0,0235	0,0225	0,0006	0,0024	0,0014	0,011	0,0038
O.S.051	55,27	0,31	0,04	0,013	0,29	0,11	0,002	43,77	0,0005	0,0145	0,0063	0,0083	0,032	0,0006	0,0026	0,0009	0,0057	0,0052
O.S.052	54,91	0,55	0,05	0,046	0,41	0,09	0,002	43,75	0,0004	0,0297	0,0058	0,0211	0,0284	0,0006	0,0024	0,0016	0,0041	0,0047
O.S.053	55,1	0,46	0,05	0,038	0,28	0,08	0,002	43,8	0,0004	0,0219	0,0057	0,0155	0,0266	0,0006	0,0017	0,0026	0,0079	0,0043

Tab. B.1- 47 observations, 18 variables (Analyses Lhoist).



**A2.2- ANALYSES échantillons « banc par banc », (60 observations, 8 variables)**

Sample	CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	S	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	PF
umber	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
O.S.054	54,29	0,72	0,11	0,074	0,83	0,33	0,002	43,45
O.S.055	54,58	0,64	0,08	0,045	0,68	0,18	0,002	43,59
O.S.056	54,25	0,63	0,11	0,048	1,18	0,27	0,002	43,32
O.S.057	54,39	0,62	0,12	0,073	0,86	0,32	0,002	43,42
O.S.058	55,03	0,59	0,03	0,073	0,15	0,04	0,002	43,89
O.S.059	54,76	0,57	0,07	0,068	0,53	0,15	0,002	43,65
O.S.060	54,68	0,61	0,07	0,062	0,56	0,18	0,002	43,64
O.S.061	54,96	0,58	0,05	0,069	0,24	0,08	0,002	43,82
O.S.062	54,89	0,58	0,06	0,046	0,34	0,12	0,002	43,77
O.S.063	55,21	0,46	0,02	0,04	0,14	0,04	0,002	43,89
O.S.064	55,16	0,5	0,05	0,058	0,12	0,03	0,002	43,89
O.S.065	54,83	0,57	0,18	0,058	0,34	0,12	0,002	43,71
O.S.066	54,6	0,6	0,06	0,042	0,81	0,13	0,002	43,56
O.S.067	53,59	0,72	0,24	0,038	1,77	0,55	0,0029	42,9
O.S.068	53,55	0,72	0,14	0,042	1,95	0,53	0,0027	42,87
O.S.069	54,00	0,74	0,08	0,059	1,35	0,32	0,0026	43,25

CALCAIRES, DOLOMIES ET CHAUX

O.S.070	54,13	0,71	0,07	0,056	1,23	0,29	0,0025	43,31
O.S.071	53,89	0,69	0,14	0,037	1,64	0,3	0,0028	43,1
O.S.072	54,68	0,44	0,18	0,027	0,78	0,24	0,002	43,45
O.S.073	55,15	0,49	0,03	0,054	0,16	0,04	0,002	43,87
O.S.074	55,23	0,36	0,04	0,032	0,27	0,07	0,002	43,79
O.S.075	55,17	0,43	0,04	0,034	0,23	0,07	0,002	43,82
O.S.076	54,73	0,63	0,05	0,078	0,53	0,09	0,002	43,69
O.S.077	55,19	0,47	0,03	0,037	0,15	0,04	0,002	43,88
O.S.078	55,21	0,43	0,03	0,054	0,18	0,05	0,002	43,85
O.S.079	55,04	0,56	0,03	0,057	0,2	0,06	0,002	43,86
O.S.080	54,9	0,58	0,05	0,059	0,35	0,08	0,002	43,78
O.S.081	54,38	0,65	0,1	0,046	0,96	0,22	0,002	43,44
O.S.082	53,84	0,64	0,18	0,048	1,67	0,41	0,0024	43,01
O.S.083	53,46	0,74	0,21	0,054	1,95	0,57	0,0024	42,82
O.S.084	53,26	0,73	0,24	0,045	2,23	0,64	0,0027	42,65
O.S.085	53,59	0,71	0,19	0,048	1,88	0,5	0,0028	42,89
O.S.086	54,39	0,7	0,06	0,067	0,87	0,21	0,0021	43,5
O.S.087	53,98	0,7	0,08	0,046	1,47	0,35	0,0028	43,18
O.S.088	55,08	0,47	0,03	0,034	0,3	0,1	0,002	43,79
O.S.089	55,01	0,51	0,03	0,043	0,32	0,1	0,002	43,78
O.S.090	55,11	0,54	0,03	0,047	0,13	0,04	0,002	43,9
O.S.091	55,19	0,45	0,02	0,037	0,18	0,06	0,002	43,86
O.S.092	54,82	0,57	0,07	0,065	0,42	0,16	0,002	43,7
O.S.093	55,33	0,41	0,02	0,023	0,08	0,01	0,002	43,93
O.S.094	55,24	0,49	0,02	0,035	0,07	0,01	0,002	43,94
O.S.095	55,15	0,53	0,02	0,044	0,11	0,03	0,002	43,92
O.S.096	54,87	0,6	0,07	0,072	0,31	0,11	0,002	43,77
O.S.097	54,96	0,6	0,03	0,059	0,23	0,08	0,002	43,84
O.S.098	55,24	0,49	0,02	0,028	0,08	0,01	0,002	43,94
O.S.099	54,8	0,64	0,07	0,05	0,34	0,13	0,002	43,77
O.S.100	55,41	0,34	0,02	0,014	0,08	0,02	0,002	43,91
O.S.101	55,41	0,31	0,02	0,011	0,14	0,03	0,002	43,88
O.S.102	55,24	0,44	0,04	0,025	0,13	0,03	0,002	43,89

O.S.103	55,2	0,4	0,04	0,015	0,26	0,08	0,002	43,81
O.S.104	55,27	0,4	0,03	0,019	0,17	0,05	0,002	43,86
O.S.105	54,6	0,59	0,09	0,033	0,67	0,27	0,002	43,55
O.S.106	54,84	0,57	0,05	0,032	0,44	0,16	0,002	43,71
O.S.107	54,96	0,53	0,04	0,029	0,35	0,13	0,002	43,76
O.S.108	55,46	0,29	0,01	0,021	0,1	0,02	0,002	43,9
O.S.109	55,22	0,43	0,02	0,02	0,19	0,06	0,002	43,86
O.S.110	55,49	0,24	0,02	0,011	0,13	0,04	0,002	43,87
O.S.111	54,93	0,55	0,04	0,032	0,35	0,13	0,002	43,77
O.S.112	54,77	0,58	0,06	0,032	0,49	0,19	0,002	43,67
O.S.113	55,35	0,34	0,02	0,014	0,17	0,05	0,002	43,86

Tab. A.2.2- Données d'analyse (60 observations, 8 variables).

**A.3- Matrices de corrélation :**✓ **A.3.1- Matrice de corrélation : 47 observations x 18 variables (Oum Settas)- Statistica 2006.**

N = 47																		
	CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	S	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	PF	BaO	SrO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Pb	Zn	Ni	V	TiO <sub>2</sub>
CaO	1,00	-0,98	-0,82	-0,70	-0,90	-0,88	-0,44	0,81	-0,63	-0,34	-0,23	-0,68	-0,93	-0,06	-0,08	-0,29	-0,63	-0,53
MgO		1,00	0,75	0,75	0,79	0,77	0,47	-0,66	0,62	0,33	0,25	0,66	0,84	0,09	0,06	0,28	0,64	0,46
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			1,00	0,49	0,78	0,79	0,47	-0,80	0,48	0,29	0,35	0,60	0,83	-0,02	0,18	0,12	0,48	0,52
S				1,00	0,49	0,46	0,10	-0,39	0,58	0,37	0,03	0,75	0,58	-0,03	-0,10	0,45	0,71	0,42
SiO <sub>2</sub>					1,00	0,95	0,30	-0,97	0,56	0,29	0,13	0,58	0,95	-0,02	0,12	0,31	0,49	0,55
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>						1,00	0,32	-0,95	0,50	0,31	0,20	0,63	0,97	0,02	0,14	0,21	0,53	0,58
MnO							1,00	-0,23	0,38	0,02	0,83	0,07	0,36	0,06	0,00	0,05	0,24	0,10
PF								1,00	-0,50	-0,29	-0,13	-0,57	-0,93	0,03	-0,12	-0,25	-0,44	-0,59
BaO									1,00	0,22	0,27	0,36	0,61	0,03	-0,20	0,29	0,60	0,49
SrO										1,00	0,05	0,55	0,33	-0,04	-0,15	-0,07	0,21	0,51
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>											1,00	0,10	0,21	-0,10	-0,06	-0,07	0,16	0,16
Na <sub>2</sub> O												1,00	0,68	-0,10	-0,11	0,22	0,69	0,56
K <sub>2</sub> O													1,00	0,00	0,08	0,29	0,64	0,58
Pb														1,00	0,10	-0,19	-0,10	0,18
Zn															1,00	-0,06	-0,11	-0,14
Ni																1,00	0,51	0,00
V																	1,00	0,32
TiO <sub>2</sub>																		1,00

✓ **A.3.2- Matrice de corrélation (107 observations, 8 variables) - Statistica 2006.**

	CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	S	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	P.F.
CaO	1	-0,89	-0,87	-0,69	-0,94	-0,94	-0,47	0,93
MgO		1	0,67	0,85	0,7	0,71	0,52	-0,66
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			1	0,48	0,87	0,9	0,41	-0,89
S				1	0,48	0,49	0,27	-0,45
SiO <sub>2</sub>					1	0,97	0,38	-1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>						1	0,38	-0,98
MnO							1	-0,36
P.F.								1

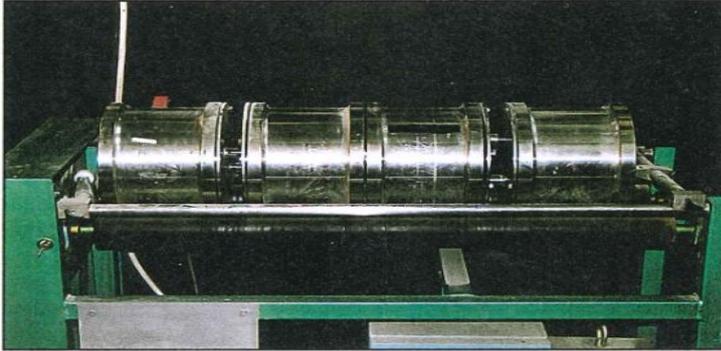
**ANNEXES B :****Annexe B.1 : Classes granulaires des granulats**

APPELLATION		Dimension de la maille des tamis en (mm)
Pierres cassées et cailloux	Gros	50 à 80
	Moyens	31,5 à 50
	Petits	20 à 31,5
Gravillons	Gros	12,5 à 20
	Moyens	8 à 12,5
	Petits	5 à 8
Sable	Gros	1,25 à 5
	Moyens	0,31 à 1,25
	Petits	0,08 à 0,31
Fines, farines et fillers		inférieur à 0,08

Fig. B.1 – Répartition granulaire des granulats.

**B.2- Essai Micro Deval**

## 2. APPAREILLAGE



## 3. PRINCIPE DE LA METHODE

-La granularité du matériau soumis à l'essai est choisie parmi les trois classes granulaires suivantes.

Classes	Charge abrasive
4 - 6,3 mm	2000 g
6,3 - 10 mm	4000 g
10 -14 mm	5000 g

- Laver , tamiser à sec sur les tamis de la classe granulaire choisie et en prélever 500 g pour l'essai , ajouter 2,5 l d'eau et la quantité de charge abrasive .
- Effectuer 12.000 tours de rotations au cylindre ( 100+/- 5 tr/min).
- Tamiser sur un tamis de 1,6 mm et en déterminer le passant " m' " par différence ( la charge abrasive est à récupérer à l'aide d'un aimant .)

## 4. EXPRESSION DES RESULTATS

$$MDE = 100 \times \frac{500-m'}{500}$$

**Fig.B.2**-Essai Micro-Deval en présence d'eau (Ministère wallon de l'équipement et des transports, Belgique).

### B.2 –Essai Los Angeles

### 1. OBJECTIF DE L'ESSAI

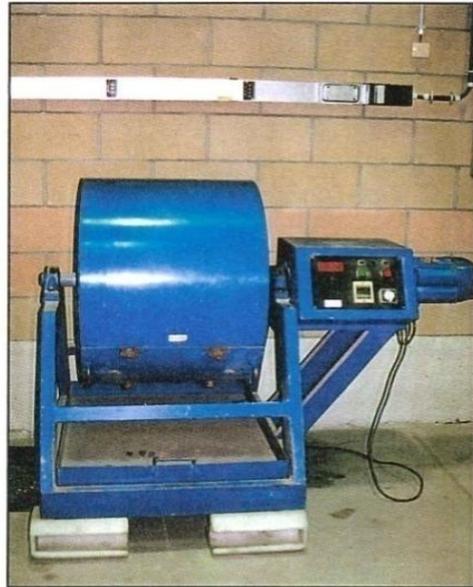
Mesurer la résistance à la fragmentation, par chocs de boulets normalisés, d'un échantillon de granulats.

### 3. PRINCIPE DE LA METHODE

- 6 classes granulaires sont prévues

CLASSE	NOMBRE DE BOULETS	MASSE TOTALE DE LA CHARGE
4 - 6.3 mm	7	3080 g
6.3 - 10 mm	9	3960 g
10 - 14 mm	11	4840 g
10 - 25 mm	11	4840 g
16 - 31.5 mm	12	5280 g
25 - 50 mm	12	5280 g

### 2. APPAREILLAGE



- Laver, et tamiser à sec sur les tamis de la classe granulaire choisie et en prélever 5000 g pour l'essai .
- Ajouter le nombre de boulets suivant la charge .
- Effectuer 500 rotations à vitesse déterminée.
- Tamiser sur un tamis de 1,6 mm et en déterminer le passant par différence ( m' ) .

### 4. EXPRESSION DES RESULTATS

$$LA = 100 \times \frac{5000 - m'}{5000}$$

Fig. B.3– Essai de fragmentation Los Angeles (Ministère wallon de l'équipement et des transports, Belgique

- **B.4- Flow-sheet de fabrication du carbonate de calcium précipité (PCC) :**

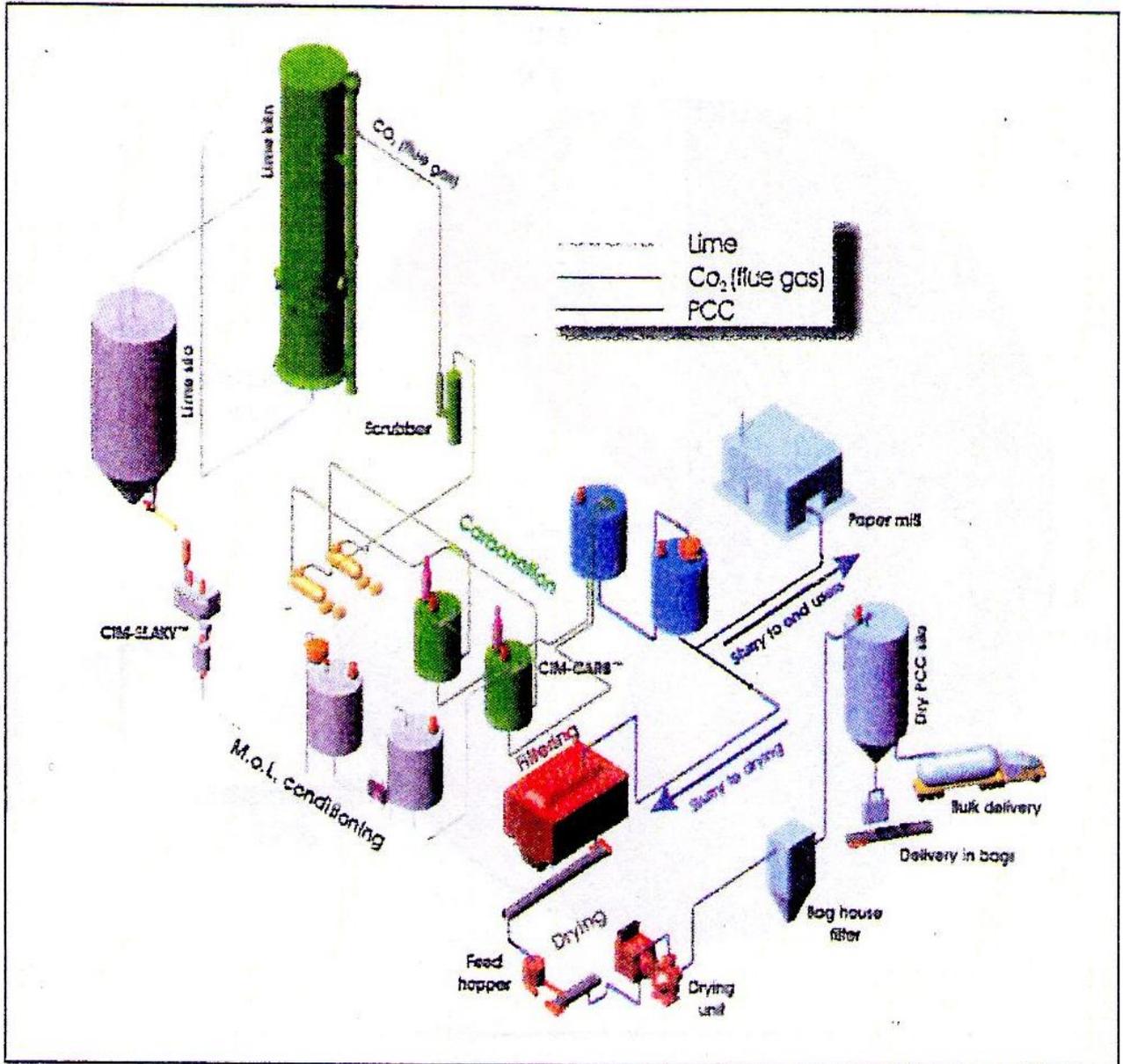


Fig.B.4 Schéma de fabrication du PCC (Cimprogetti, in HARDER, J., 2007)

B.5- Préparation du carbonate de calcium : schéma simplifié (ENG. El Khroub)

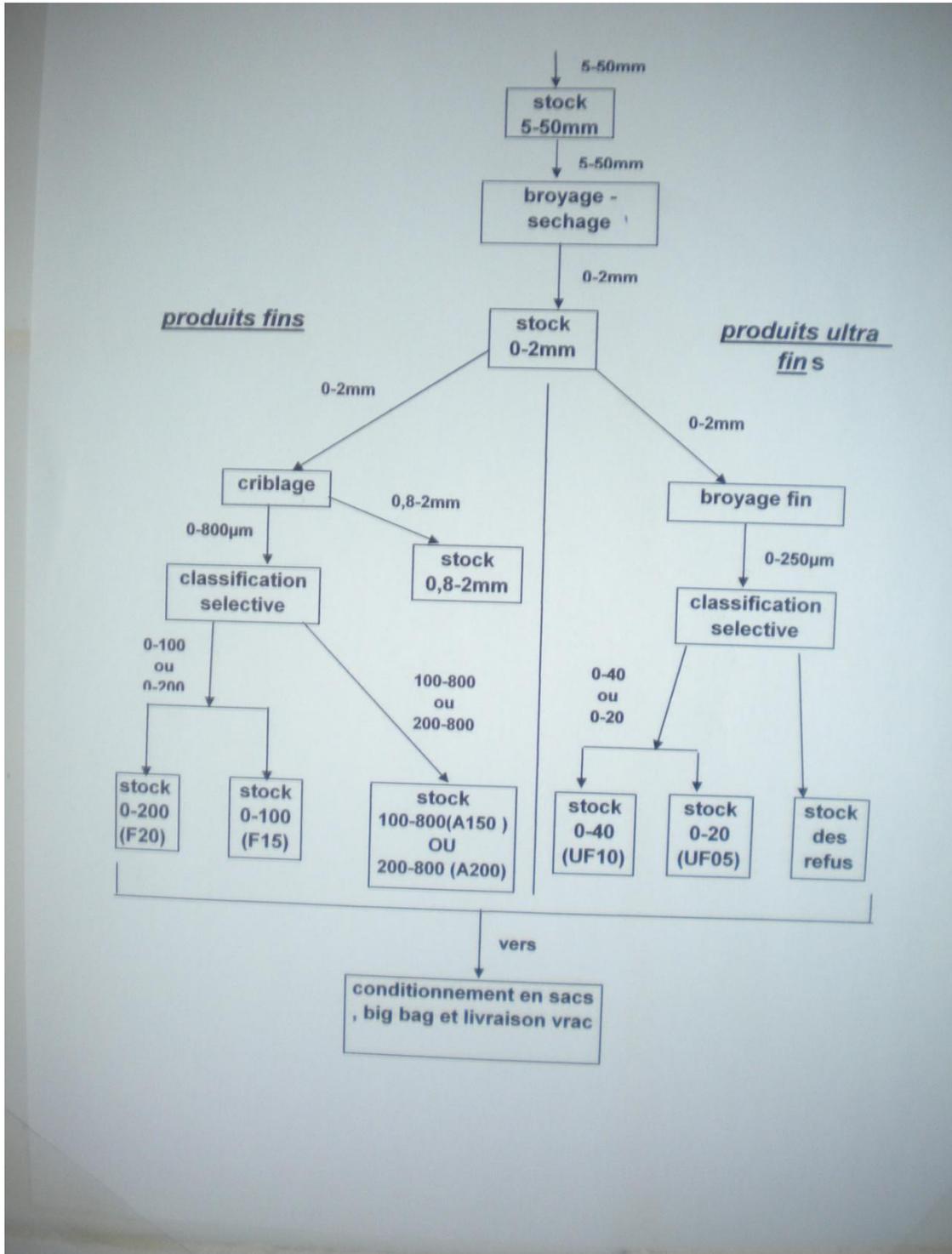
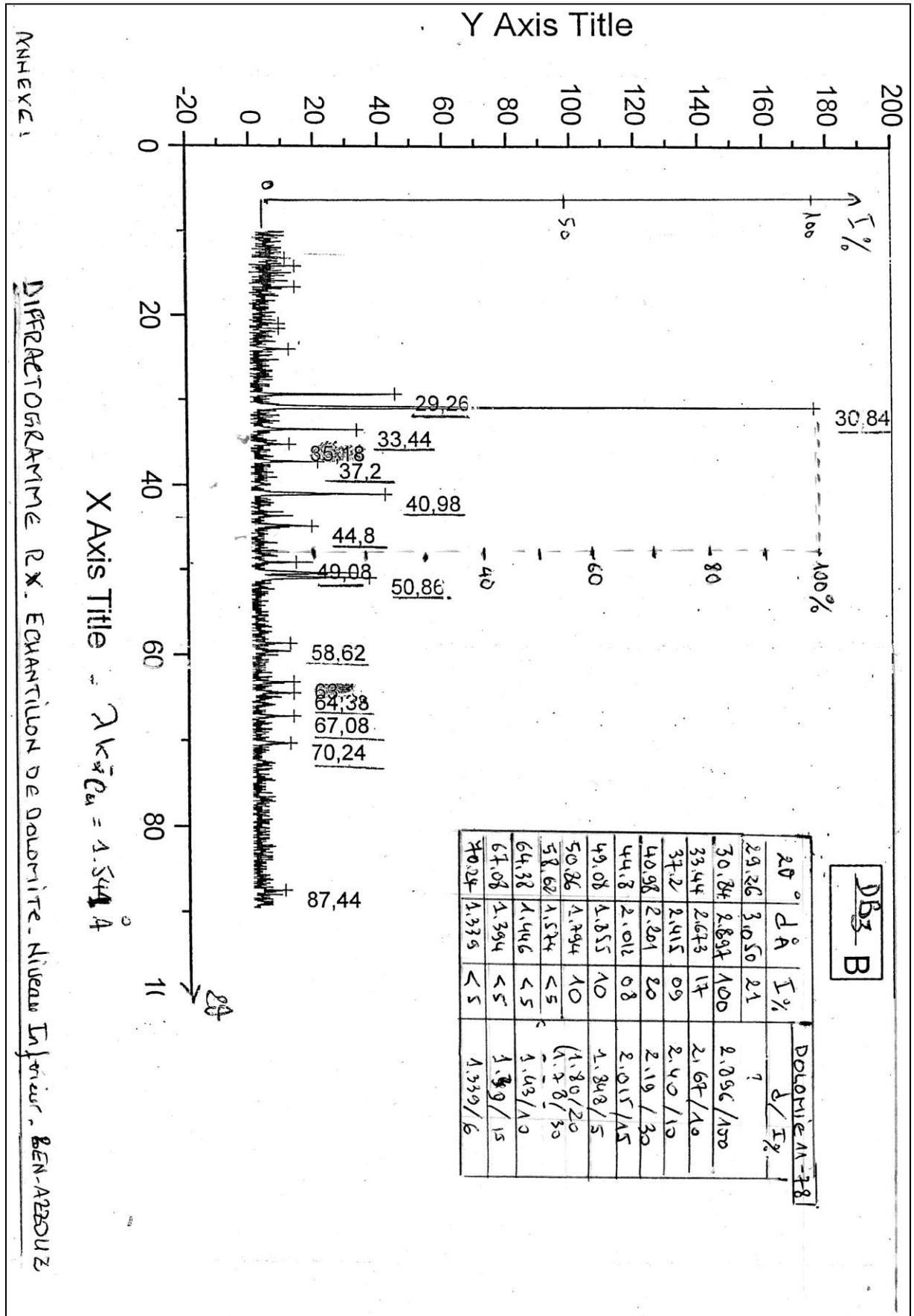


Fig.B.5- Schéma de broyage du carbonate de Calcium (ENG- El Khroub).

## NORMES CITEES

En marge des normes algériennes traitant surtout des granulats et citées par *Gadiri* (2009- fichier internet), rappelons quelques unes utilisées en Europe :

- NF EN 459 : elle se décompose en 3 parties :
  - partie 1 : définition, spécifications et critère de conformité ;
  - partie 2 : méthodes d’essais ;
  - partie 3 : évaluation de la conformité.
- NF EN 933 : Norme d’essai pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats.
- NF EN 1097-1 : Norme définissant et donnant le mode opératoire de l’essai Micro-Deval (MDE).
- NF EN 1097-2 : Norme définissant et donnant le mode opératoire de l’essai Los Angeles (LA).
- NF EN 1097-8 Norme définissant et donnant le mode opératoire de l’essai de Polissage.
- X PP 18-580 Norme caractérisant les gravillons d’origine naturelle ou artificielle utilisées pour la réalisation des couches de roulement de chaussées.



**Liste des figures et tableaux****1)- FIGURES :**

- <b>Fig.1.21</b> : Classification des roches carbonatées	
a)- en fonction du rapport Ca/Mg - b)- en fonction de la teneur en argile.....	p.15
- <b>Fig.1.22</b> : Classification des roches carbonatées selon FOLK.....	p.17
- <b>Fig.1.23</b> : Classification des roches carbonatées selon DUNHAM.....	p.18
- <b>Fig.1.24</b> : Représentation des types de porosité.....	p.19
- <b>Fig.3.1</b> : Schéma des réactivités de la chaux.....	p.28
- <b>Fig.3.2</b> : Morphologie de la chaux (Image MEB).....	p.29
- <b>Fig.3.3</b> : Evolution de la réactivité en fonction de la température de cuisson	p.30
- <b>Fig.3.4</b> : Mailles élémentaires.....	p.31
- <b>Fig.3.6</b> : Processus de frittage dans une chaux CaO.....	p.35
- <b>Fig.3.7</b> : Courbe d'évolution de la MVA d'une dolomite cuite.....	p.36
- <b>Fig.3.8</b> : Schéma simplifié d'un four vertical.....	p.39
- <b>Fig.3.9</b> : Schéma simplifié d'un four à cycles alternés.....	p.40
- <b>Fig.3.10a ; 3.10b</b> : Fours MAERZ.....	p.40
- <b>Fig.3.11</b> Schéma simplifié d'un four à chaux rotatif.....	p.41
- <b>Fig.3.13</b> Schéma de principe de l'hydrateur à chaux.....	p.43
-	
- <b>Fig.4.1</b> Fiche technique carbonate de calcium, UF 5- ENG-Khroub.....	p.46
- <b>Fig.4.3</b> Schéma de traitement de l'eau à usage domestique et industriel.....	p.54
- <b>Fig.4.4</b> Schéma de traitement des boues.....	p.55
- <b>Fig.4.5</b> Récapitulation des usages des calcaires et dolomies.....	p.60
-	
- <b>Fig.5.1</b> Répartition de la production mondiale de chaux.....	p.61
- <b>Fig.5.2</b> Principaux pays producteurs de chaux dans le monde.....	p.62
- <b>Fig.5.3</b> Utilisation sectorielle de la chaux au Canada.....	p.62
- <b>Fig.5.5</b> Schéma simplifié de fabrication de la chaux (El Hadjar).....	p.66
-	
- <b>Fig.6.1</b> Cartes du contexte géologique de la région de Constantine.....	p.69
- <b>Fig.6.2</b> Schéma des ensembles litho-structuraux d'Afrique.....	p.70
- <b>Fig.6.3</b> Rapports structuraux.....	p.71
- <b>Fig.6.4</b> Position des nappes de flyschs.....	p.73
- <b>Fig.6.5</b> Coupe synthétique des Maghrébides de l'est algérien.....	p.73
- <b>Fig.6.6</b> Répartition régionale des massifs néritiques constantinois.....	p.75
-	
- <b>Fig.7.1</b> Eléments structuraux de la chaîne calcaire et des flyschs.....	p.77
- <b>Fig.7.2</b> Photo Google de la région du Safia.....	p.78
- <b>Fig.7.3</b> Log stratigraphique secteur du Safia.....	p.80
- <b>Fig.7.4</b> Coupe synthétique traversant les monts du Safia.....	p.82

- <b><u>Fig.7.5</u></b> Corrélation stratigraphiques- massifs du néritique constantinois.....	p.84
- <b><u>Fig.7.6</u></b> Log stratigraphique région d'Aïn M'lila.....	p.86
- <b><u>Fig.8.1</u></b> Photo Google Djendel (2011).....	p.94
- <b><u>Fig.8.2</u></b> Profil géologique E-W, Djendel.....	p.96
- <b><u>Fig.8.5a</u></b> Photo Google carrière de Ben Azzouz (2011).....	p.99
- <b><u>Fig.8.5b</u></b> Carrière de Ben Azzouz, vue vers le SE .....	p.99
- <b><u>Fig.8.6</u></b> Reconstitutions lithologiques de sondages (Ben Azzouz).....	p.100
- <b><u>Fig.8.7a – 8.7b</u></b> Niveaux schisteux Ben Azzouz .....	p.101
- <b><u>Fig.8.8a - 8.8b</u></b> Calcaire oxydé et calcaire karstifié.....	p.102
- <b><u>Fig.8.11</u></b> Carte géologique et structurale Oum Settas (1/50000).....	p.106
- <b><u>Fig.8.12</u></b> Topographie partielle de la carrière Oum Settas.....	p.107
- <b><u>Fig.8.17</u></b> Image synthétique en 3D- corrélation Oum Settas.....	p.112
- <b><u>Fig.8.18</u></b> Schéma de corrélation $\text{CaCO}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$ (2001).....	p.113
- <b><u>Fig.8.19</u></b> Nuage de corrélation $\text{SiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$ .....	p.114
- <b><u>Fig.8.20</u></b> Exemple de dispersion des teneurs de $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .....	p.114
- <b><u>Fig.8.21</u></b> Carte des formations du néritique constantinois.....	p.116
- <b><u>Fig.8.22</u></b> Extrait de la carte géologique d'Aïn M'lila (1/50000).....	p.118
- <b><u>Fig.8.23</u></b> Montage carte et photos, massif du Télioualt.....	p.119
- <b><u>Fig.9.1</u></b> Photo Google Djendel (2011).....	p.122
- <b><u>Fig.9.2</u></b> Carte Topographique partielle carrière de Djendel.....	p.123
- <b><u>Fig.9.3</u></b> Graphique de corrélations calcaires de Djendel.....	p.124
- <b><u>Fig.9.4</u></b> Tendances corrélatives d'éléments composants le calcaire de Djendel	p.125
- <b><u>Fig.9.5a -9.5b et 9.6</u></b> Photos de différentes vues de Ben Azzouz.....	p.126
- <b><u>Fig.9.7</u></b> Fond topographique d'échantillonnage, Ben Azzouz.....	p.127
- <b><u>Fig.9.9</u></b> Graphes de corrélation des oxydes du calcaire.....	p.129
- <b><u>Fig.9.10</u></b> Photo Google de la carrière de l'Oum Settas ((2008).....	p.131
- <b><u>Fig.9.11</u></b> Photo de fossiles(Hippurites, rudistes et débris).....	p.132
- <b><u>Fig.9.12 à 9.17</u></b> Photos d'observations microscopiques montrant le contenu litho- paléontologique de calcaires du Cénomaniens-Turonien de l'Oum Settas.....	p.133
- <b><u>Fig.9.18</u></b> Profils synthétiques, carrière de l'Oum Settas.....	p.134
- <b><u>Fig.9.19</u></b> Lithologie et échantillonnage. Profil A.....	p.135
- <b><u>Fig.9.21</u></b> Evolution de $\text{SiO}_2$ et $\text{Fe}_2\text{O}_3$ par rapport à $\text{CaO}$ .....	p.137
- <b><u>Fig.9.22</u></b> Graphique de corrélation des éléments majeurs.....	p.138
- <b><u>Fig.9.23</u></b> Graphique de synthèse des corrélations.....	p.139
- <b><u>Fig.9.24</u></b> Graphique de corrélation (47 observations, 18 variables).....	p.140
- <b><u>Fig.9.25</u></b> Coupe schématique N-S, carrière de Télioualt.....	p.141
- <b><u>Fig.9.26</u></b> Dolomie en boules dans poches karstiques carrière de Télioualt....	p.142
- <b><u>Fig.9.27</u></b> Photos de la carrière et du Kef El Ahmar, échantillonnage.....	p.143
- <b><u>Fig.9.28</u></b> Reconstitution lithologique partielle de Kef El Ahmar.....	p.144
- <b><u>Fig.9.30 à 9.37</u></b> Observations microscopiques, dolomies de Télioualt.....	p.146

- <b><u>Fig.9.39</u></b> Quelques corrélations inter éléments-Carrière et Kef El Ahmar.....	p.148
- <b><u>Fig.10.1</u></b> Courbe ATD-ATG dolomie de Télioualt, <u>composite 1</u> .....	p.150
- <b><u>Fig.10.2</u></b> Courbe ATD-ATG dolomie de Télioualt, <u>composite 2</u> .....	p.151
- <b><u>Fig.10.6</u></b> Appareillage de mesure et paramètres de réactivité .....	p.155
- <b><u>Fig.10.7</u></b> Courbe de réactivité de chaux en fonction de T° .....	p.156
- <b><u>Fig.10.8</u></b> Courbe d'indice d' « effritement » <b>SBI%</b> .....	p.157
- <b><u>Fig.10.9</u></b> Courbe d'indice de « vulnérabilité » <b>STI%</b> .....	p.158
- <b><u>Fig.10.10</u></b> Courbe d'indice d' « attrition » <b>ATI%</b> .....	p.159

## **2)- TABLEAUX**

- <b><u>Tab.12.5</u></b> Dolomies, tolérances en impuretés chimiques.....	p.21
- <b><u>Tab.3.12</u></b> Fours à chaux en service Union Européenne.....	p.42
- <b><u>Tab.5.4</u></b> Principaux producteurs de chaux dans le monde.....	p.64
- <b><u>Tab.8. 3</u></b> Essais physico-mécaniques calcaires Djendel (1999).....	p.97
- <b><u>Tab.8. 4</u></b> Analyses chimiques calcaires de Djendel .....	p.98
- <b><u>Tab.8. 9</u></b> Essais physiques calcaires de Ben Azzouz...(1977).....	p.103
- <b><u>Tab.8. 10</u></b> Analyses chimiques calcaires de Ben Azzouz.....	p.104
- <b><u>Tab.8. 13</u></b> Essais physiques calcaires de l'Oum Settas.....	p.108
- <b><u>Tab.8. 14</u></b> Usures et rendement d'agrégat, Oum Settas (1978).....	p.109
- <b><u>Tab.8. 15</u></b> Analyses chimiques calcaires, Oum Settas (1978).....	p.109
- <b><u>Tab.8. 16</u></b> Analyses chimiques calcaires, Oum Settas (1991).....	p.110
- <b><u>Tab.8. 24</u></b> Paramètres physiques, dolomies de Télioualt.....	p.119
- <b><u>Tab.8. 25</u></b> Analyses chimiques, dolomies de Télioualt.....	p.120
- <b><u>Tab.9.3</u></b> Analyses chimiques Djendel (2009).....	p.124
- <b><u>Tab.9.8</u></b> Analyses chimiques Ben Azzouz (2007-2009).....	p.128
- <b><u>Tab.9.20</u></b> Dosages de CaO, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> et SiO <sub>2</sub> par banc échantillonné.....	p.136
- <b><u>Tab.9.38</u></b> Analyses chimiques dolomies de Télioualt.....	p.147
- <b><u>Tab.10.3</u></b> Analyses chimiques échantillons composites (Khroub, Djendel-Lhoist).....	p.153
- <b><u>Tab.10.4</u></b> Coefficient d'absorption d'eau <b>WA</b> Khroub, Djendel (Lhoist)....	p.154
- <b><u>Tab.10.5</u></b> Valeurs porosités, densités : Khroub, Djendel (Lhoist).....	p.154

## ملخص :

الحجر الجيري من الصخور الأكثر استخداما منذ أقدم العصور، وخاصة في مواد البناء. ومع تطور البحوث في هذا المجال، يجد تطبيقات متنوعة على نحو متزايد في عدد كبير من المجالات المتعلقة بالحياة كل يوم. ويعتبر انتاج مثل هذه المواد في البلدان المتقدمة من مؤشرات التنمية الاقتصادية بها. الحجر الجيري هو مادة كيميائية معدنية بسيطة. ويتم الحصول عليها عن طريق تعريض الكربونات الطبيعية النقية الي 1000 درجة مئوية، وهي عبارة عن حجر الجيري والدولوميت. ويمكن انتاج انواع مختلفة من الجير وذلك حسب نوعية المادة الخام من جهة وطريقة الطهي من جهة اخرى. ويعتبر استخدام هذه المواد قديم العهد في الجزائر، ولكن يعود إنتاجه الصناعي الوحيد منذ السبعينات، مع بداية الصناعات الحديدية و بشكل حصري تقريبا لدعم احتياجات هذه الصناعة. ولكن يبقى استعماله في المجالات الاخرى جد محدود. ان اي قطب صناعي حديث يحتاج الي استحداث هذا المنتج وذلك لتلبية الاستعمالات في الحاضر و المستقبل.

هذه الدراسة هي مساهمة جزئية لابرار خصائص المواد الاولية من جهة و التعريف بمصادرها من جهة اخرى. ان خصائص هذه المواد الاولية هو العنصر الهام الذي يتحكم بصفة اساسية بجودة المنتج . ولكي ندرس طبيعة هذه الصخور اخترنا اربعة محاجر وتقع هذه المحاجر في منطقتين مختلفتين من حيث البنية الجيولوجية :

المنطقة الاولى اين تتواجد محجرة جندل ومحجرة بن عزوز وتتواجدان في منطقة سكيكدة حيث يتم استخراج الحجر الكلسي من التركيبات الجيولوجية (اللياس) من جبل صافية ب المنطقة المسماة «prékabyle» و تزود هذه المحاجر الحجار بالصخور الكلسية.

اما المنطقة الثانية اين توجد محجرة الخروب وعين مليلة بمنطقة "النيريتي" القسنطيني . الاولى يستخرج منها الحجر الكلسي وهي عبارة عن صخور كلسية ذات جودة عالية و الثانية هي محجرة تايوالت بعين مليلة ويستخرج منها الدولوميت وهي ايضا تزود الحجار بالمواد الاولية .

هذه المحاجر تمت دراستها بالاعتماد علي البحوث المنجزة حول موقعها الجيولوجي و المنجمي. بعد ذلك، بدءا من ملاحظتنا، و أخذ عينات للعلاجات المختلفة خاصة فيما يتعلق بتصنيع الجير و التحاليل الكيميائية لعينات الاختبار، ومختلف الأوصاف و التجارب المخبرية و من مجموع النتائج المحصل عليها تبين ان هذه الصخور تمتاز بطبيعة فيزيائية و حرارية مناسبة لصناعة الجير و هو ما تظهره صخور محجرة جندل وبن عزوز وهذه الاخيرة تغطي احتياجات قطب التعدين بالحجار.

وفي ما يخص نتائج دراسة الحجر الكلسي للخروب و تيوالت فهي جد مرضية جدا. وبعيدا عن صناعة الصلب، هناك تطبيقات جديدة ممكنة: معالجة المياه والاحتياجات الأخرى من مختلف القطاعات الصناعية التي تتطلب تجارب إضافية متخصصة. ولكن من حيث الكمية و النوعية فإنه يوجد امكانات مناطق المجاورة لهذه المواقع و التي تظهر نفس الصفات و الخصائص المتوفرة في هذه المحاجر المدروسة و التي تتطلب أيضا المزيد من البحث و الدراسة.

من جهة اخرى فان تصنيع انواع مختلفة من الجير سيكون نوع من التحدي الصناعي في التنمية المستدامة.

ورغم أن هذا الجير هو منتج محلي قابل للتلف مع كلفة مالية محدودة، إلا إن له العديد من الفوائد. وفيما يخص المواد الخام و خاصة الحجر الجيري هناك العديد من المواقع المتواجدة في الشرق الشمالي الجزائري التي تستوجب إعادة تقييم منها المجموعات الكربوننتية العائدة للعصور : Jurassique و Crétacé التي يبدو انها الأكثر ملاءمة للإستغلال.

يتوجب حين البحث استهداف التركيبات الأكثر عضوي التي ترسبت في محيط مائي ضحل وهادئ، و ذات مكونات متجانسة ولم تتعرض لحركات تكتونية شديدة. اما عن وحدات التصنيع المدروسة، بالإضافة إلى الجودة، يجب أن تكون المواد الخام كافية لضمان استدامة المرافق. ينبغي أن تتواجد هذه المرافق على قدر الإمكان على حد سواء بالقرب من مناطق الإستغلال (المحاجر) ومراكز الاستهلاك من أجل الحد من تكاليف النقل.

**كلمات مفتاحية** : الكلس، الدولوميت، الجيولوجيا، الإستكشاف، تطبيقات، الجير، الشرق الشمالي الجزائري.

## Abstract

---

This study is a contribution work intended to make known the lime as well as its production sources; limestone and dolomite.

Raw materials quality is a prerequisite to obtain a good and effective product. For this purpose, four active quarries have been selected; these quarries are situated in quite different geological environments of northeastern Algeria.

For limestone: Djendel career and terraced Ben Azzouz career, both located in the “prékabye” area near Skikda have been selected as well as Khroub quarry known for its production of high quality calcium carbonate. For dolomite, Téioualt career near Aïn M’lila is taken into account. The last two careers are part of Constantine’s neretic formations.

Such working sites are each discussed in the local geological and mining context. All their products serve – currently Djendel and Teioualt - or have served temporarily, the lime plant of El Hadjar steel complex.

Based on field observations and taken samples, several chemical analyzes, cooking tests and other characterizations tests were carried out.

The results confirmed the adequacy of samples physico-mechanical and thermal properties and their suitability for lime manufacturing. The obtained results validated Djendel and Ben Azzouz ability to continue to fill the needs of steel industry. The limestone reserves; quite abundant in Djendel; could allow, in case of qualitative failure to carry out a selective exploitation. The Ben Azzouz’s limestone bench overcomes a dolomitic sitting that could be interesting to prospect...

For Khroub limestones and Téioualt dolomites, the results are even more conclusive. For these substances, and beyond the steel industry, other uses are possible: water treatment and other applications, this should be confirmed by specific feasibility tests ... But in terms of quantity and in the eventuality limestone units will be selected, new possibilities should be highlighted near these sites as long as the same qualities and the same basic material homogeneity still continue. Appropriate assessment should be conducted in this way.

For raw materials, especially limestone, many north eastern Algerian sites should be promoted. Carbonate sets from Cretaceous and Jurassic periods are most favorable for investigations. The assessments should target rather organogenic formations of marine origin, platform or reef type, whose deposits were held in quiet and shallow areas... as long as the deposits are sufficiently thick, homogeneous and undisturbed by tectonic...

Produce some varieties of lime needed for the most critical current needs seems to be a strategic choice within the scope of sustainable development...

**Key words:** Limestone, dolostone, geology, exploration, applications, lime, North-Eastern Algeria.

## Résumé

---

Cette étude est une contribution destinée à faire connaître la chaux sous divers aspects ainsi que le calcaire et la dolomie à l'origine de sa fabrication.

La qualité des matières premières est un préalable requis pour l'obtention d'un produit performant. Pour ce faire, nous avons choisi quatre carrières en activité, situées dans deux contextes géologiques assez différents du NE algérien. Pour le calcaire : retenons la carrière de Djendel et celle mitoyenne de Ben Azzouz, situées dans le domaine prékabyle, près de Skikda. Une autre carrière de calcaire, celle du Khroub connue pour sa production de carbonate de calcium de qualité. Pour la dolomie, l'attention a porté sur la carrière de Téioualt près d'Aïn M'lila. Ces deux dernières font partie des formations néritiques constantinoises.

De telles exploitations sont examinées chacune dans le contexte géologique et minier local. Tous leurs produits desservent - ceux de Djendel et de Téioualt actuellement - ou ont desservi temporairement l'usine à chaux du complexe sidérurgique d'El Hadjar.

Partant de l'observation de terrain et des prélèvements effectués, diverses analyses chimiques, des tests de cuisson et autres essais de caractérisations ont été menés.

Les résultats obtenus confirment les bonnes aptitudes tant physico-mécaniques que thermiques de nos échantillons et leur comportement propices à la fabrication de chaux. Résultats valables à Djendel et Ben Azzouz pour continuer à pourvoir les besoins de la sidérurgie. Les réserves de calcaire- suffisamment abondantes à Djendel- permettent, en cas de défaillance qualitative, de procéder à une exploitation sélective. A Ben Azzouz le banc calcaire exploité surmonte une assise dolomitique à prospecter...

Ces résultats sont encore plus probants pour les calcaires du Khroub ainsi que pour les dolomies de Téioualt. Pour de telles substances, et au delà de la sidérurgie, d'autres utilisations sont envisageables : traitement des eaux et autres applications, à conforter par des essais spécifiques de faisabilité... Mais au plan quantitatif et pour les cas où des unités à chaux seront retenues, de nouvelles potentialités devront être mises en évidence dans les environs immédiats de ces sites pour peu que les mêmes qualités et les mêmes homogénéités des matériaux de base se maintiennent. Des prospections appropriées devront être menées dans ce sens.

Pour les matières premières, calcaires surtout, de nombreux sites du NE algérien restent à valoriser. Les ensembles carbonatés du Crétacé et du Jurassique sont les plus favorables à des investigations. Les prospections devront cibler des formations plutôt organogènes, d'origine marine, de plateforme ou de type récifal, dont les dépôts ont eu lieu en milieu calme et peu profond... pour peu que ces dépôts soient suffisamment épais, homogènes et peu perturbés par la tectonique...

Produire quelques variétés de chaux, nécessaires aux besoins actuels les plus vitaux, semble être un choix stratégique rentrant dans le cadre du développement durable...

**Mots clés** : Calcaire, dolomie, géologie, prospection, applications, chaux, nord-est Algérie.

## **REMERCIEMENTS**

Au terme de cette étude, il m'est agréable de remercier tous ceux et celles qui, de près ou de loin, ont contribué à sa réalisation en espérant que chacun trouvera ici, l'expression de ma profonde gratitude.

Mes pensées vont d'abord à ce cher Professeur Jean VERKAEREN- aujourd'hui en retraite- qui m'a accueilli voilà un peu plus de dix années maintenant, à l'ex laboratoire de Géologie et Minéralogie (GEM) dont il était le directeur, à l'université catholique de Louvain (UCL) en Belgique. Plein de gentillesse et de sollicitude, son souvenir restera longtemps gravé dans ma mémoire, car son soutien est immense.

Au Professeur KOLLI Omar, directeur du laboratoire de Géologie et Métallogénie, à l'université des Sciences et Technologies Houari Boumediene (USTHB)-Alger qui, sans hésiter, a accepté de diriger ce travail en y apportant le soutien, l'attention et le réconfort dont j'avais besoin aux moments les plus difficiles que j'avais eu à traverser. Je lui témoigne ici respect et reconnaissance.

A Monsieur BENALI H ; professeur de géologie au département des Sciences de la Terre de l'USTHB, Alger qui me fait l'honneur de participer au jury de soutenance, et auquel je fais part d'une vive reconnaissance.

Je remercie monsieur SERRAR M.C, professeur de physique à la faculté des Sciences Exactes université Constantine 1 qui me fait l'honneur de participer au jury d'examen et dont l'intervention donnera sans doute lieu à des remarques et des demandes de mises au point aussi utiles qu'enrichissantes.

Au professeur BENABBAS Ch., qui m'a apporté tout le long de ce parcours, appui moral et matériel. Je le remercie beaucoup. Son agréable compagnie et son attention sont très touchantes.

Au professeur BOUREFIS Ah., ce compagnon de longue date, porte un grand intérêt pour les géomatériaux en général et les carbonates en particulier. Sollicité il y a plus près de deux ans, pour donner son avis sur la rédaction de mes tous premiers chapitres, il m'a fait part d'intéressantes remarques. Avec lui, des échanges de vue parfois fructueux sur les carbonates et leurs applications ont eu lieu à plusieurs reprises

Je remercie vivement MM. Vincent DEGROOTE et Alain LAUWERS géologues au groupe industriel LHOIST en Belgique pour leurs aides respectives. Avec le premier, j'ai eu le plaisir de faire du terrain dans les différents sites (massif du Safia dans la région de Skikda, à El Khroub...) lors des échantillonnages effectués dans ces secteurs. C'est lui qui supervisait en Belgique le suivi des tests et analyses se rapportant à mes échantillons.

Alain LAUWERS, l'autre géologue-formateur du groupe, est celui qui m'a le plus donné pour finaliser ce travail. Il n'a ménagé aucun effort, depuis 2003, par l'envoi de documents et

références se rapportant au sujet, pour prodiguer conseil et donner réponses à mes nombreuses questions. Sa collaboration, son suivi attentif, l'accueil que ses collègues dont Etienne Burnotte, Nicolas, Jo... et lui-même m'ont réservé en Belgique durant mes brèves visites chez LHOIST ont été très touchants. Je lui dois toute ma reconnaissance et une grande marque de sympathie.

Mes pensées vont aussi à l'aimable personnel du groupe LHOIST au niveau du siège et dans les unités que j'ai eu le plaisir de visiter en Belgique. Ce sont les cadres, techniciens et tous ceux qui m'ont apporté diverses facilités ayant mené à la finalisation de cette thèse. Je citerai en particulier MM. Crinière, G., Pelletier, M... et leurs équipes du centre de recherche du groupe, basé à Nivelles, en Belgique.

Je n'oublierai pas non plus le personnel de L'ENG pour les facilités accordées lors de mes passages dans les différents sites d'étude. Je citerai en particulier Mr Filali C. actuel directeur de l'unité du Khroub, que j'ai eu l'agréable plaisir de connaître auparavant comme directeur de l'unité ENG de Ben Azzouz. Ses accueils ont toujours été chaleureux et attentionnés. Je remercie également le personnel du laboratoire ENG du Khroub avec à leur tête Mr Boubekeur aujourd'hui en retraite. Pareillement mes salutations vont aux ingénieurs chargés de l'exploitation respectivement, Mr Baghouli à la carrière du Khroub ; Mr Hebhou à la carrière de Ben Azzouz ; Mr Khettab, à la carrière Arcelor Mittal de Djendel. Je remercie aussi Mr Bouarab, l'actuel directeur de la carrière de Téioualt en pensant particulièrement à Mr Mehsès et Mr Sakher H., cadres à la société Algran filiale de l'ENOF. Ce dernier, appelé à d'autres fonctions, m'a apporté une aide précieuse.

Je remercie aussi, beaucoup, Mr Naïm Benabdallah, cet informaticien de talent ; sa contribution tout au long de ce travail dont l'arrangement des textes et illustrations est immense.

Je dois également beaucoup à mes collègues, je pense en particulier à Mr Boularak Moussa avec lequel j'ai fait de nombreuses sorties de terrain. C'est un compagnon irremplaçable ! J'ai beaucoup appris et bénéficié de son expérience de terrain, de son expérience tout court.

Je ne remercierai jamais assez Mlle Aït Abdelouahab Djaouza, sa contribution sur terrain, dans la préparation et l'examen des lames minces ainsi que ses conseils sont immenses. Le tout dans la bonne humeur. J'ai beaucoup bénéficié de ses connaissances du milieu sédimentaire. Je remercie aussi Mr Kacimi M. pour ses contributions.

Mes pensées vont également à l'ensemble de mes collègues de la faculté des Sciences de la Terre ; en souhaitant plein succès à ceux qui préparent leurs examens... tout en remerciant le personnel administratif et de soutien de la faculté, chacun pour sa contribution ...

Je ne terminerai pas sans remercier les étudiants qui m'ont apporté leur soutien dans la mise en forme et l'illustrations diverses. Je pense en particulier à Mr Nasri F.

A ceux et celles que j'ai oublié de citer, Je demande pardon. Ma reconnaissance leur est adressée tout aussi chaleureusement.