



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du Diplôme de Master en Génie minier
Option : Valorisation des Ressources Minérales

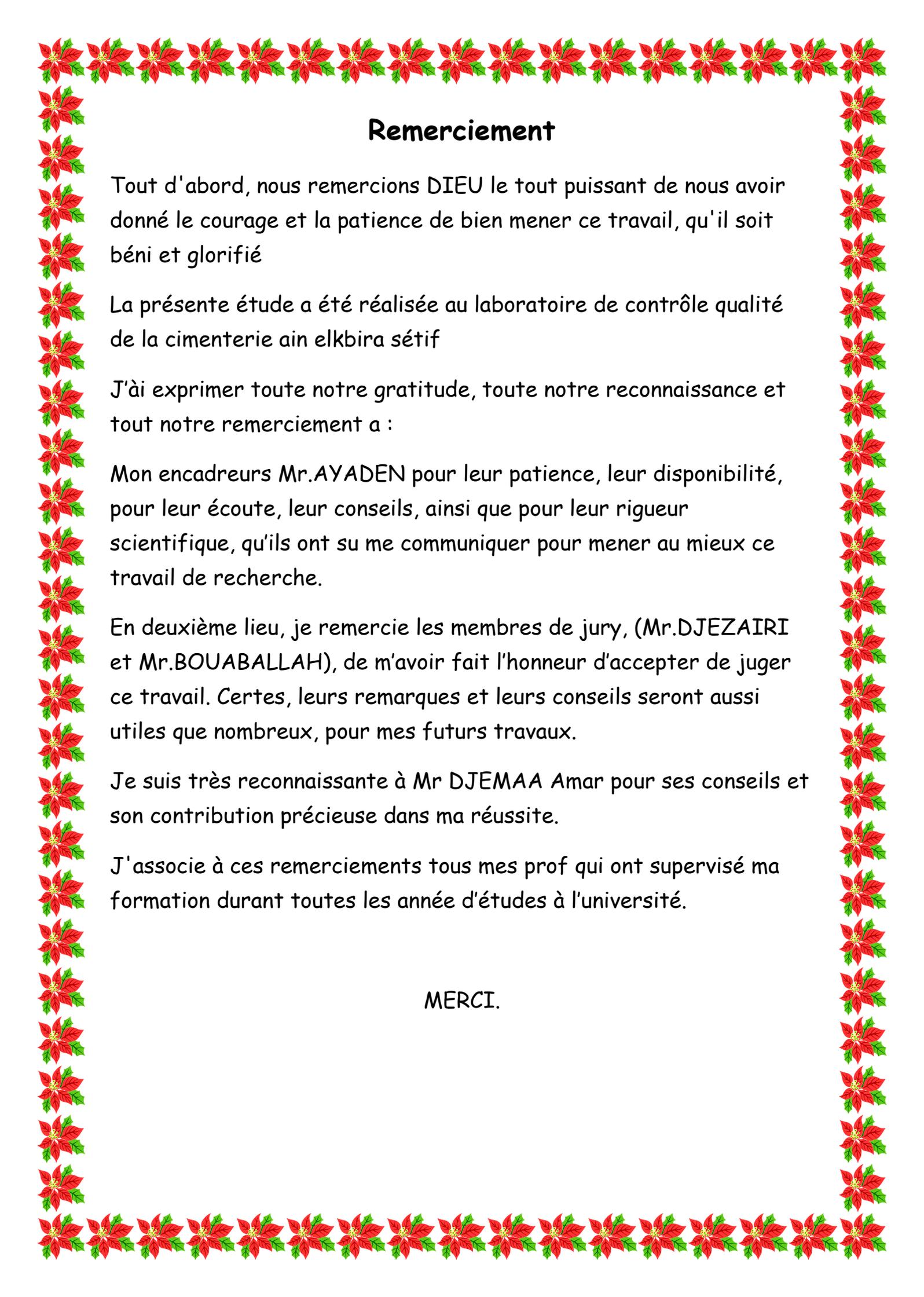
Présenté par
RAMDANI Khaled

Thème

**APPLICATION DE TUF VOLCANIQUE DANS LE
BETON
(Cas de la carrière de tuf)**

Soutenu le ; 04/10/2021 devant le jury composé de :

Président :	DJAZEIRI. O	MAA	U.A.M.B
Examineur :	BOUABDALLAH.S	MCB	U.A.M.B
Promoteur :	AYADEN. B	MAA	U.A.M.B



Remerciement

Tout d'abord, nous remercions DIEU le tout puissant de nous avoir donné le courage et la patience de bien mener ce travail, qu'il soit béni et glorifié

La présente étude a été réalisée au laboratoire de contrôle qualité de la cimenterie ain elkbira sétif

J'ai exprimé toute notre gratitude, toute notre reconnaissance et tout notre remerciement à :

Mon encadreur Mr. AYADEN pour leur patience, leur disponibilité, pour leur écoute, leur conseils, ainsi que pour leur rigueur scientifique, qu'ils ont su me communiquer pour mener au mieux ce travail de recherche.

En deuxième lieu, je remercie les membres de jury, (Mr. DJEZAIRI et Mr. BOUABALLAH), de m'avoir fait l'honneur d'accepter de juger ce travail. Certes, leurs remarques et leurs conseils seront aussi utiles que nombreux, pour mes futurs travaux.

Je suis très reconnaissante à Mr DJEMAA Amar pour ses conseils et son contribution précieuse dans ma réussite.

J'associe à ces remerciements tous mes prof qui ont supervisé ma formation durant toutes les années d'études à l'université.

MERCI.



Dédicaces

A mes très chers parents pour m'avoir poussée dans
la voie du savoir.

A mes frères et mes sœurs et à toute ma famille

A mes chers professeurs pour vos efforts, votre
motivation et encouragement tout au long des années
scolaires.

A mes amis fidèles qui ont toujours été à mes côtés à
travers vents et marées

SOMMAIRE

<u>Chapitre1</u>	<u>Généralités sur les tufs zéolithiques</u>
INTRODUCTION GENERALE -----	1
1.Introduction -----	2
2. Définition des tufs -----	2
3. Formation des tufs volcaniques-----	3
4. Types des tufs -----	4
A. Tufs soudés -----	4
B. Tufs rhyolitiques -----	4
C. Tufs trachyte -----	4
D. Tufs andésitiques-----	4
E. Tufs basaltiques -----	4
F. Tuf ultramafiques -----	5
5.Domains d'application -----	5
5.1. L'agriculture-----	5
5. 2. L'industrie -----	5
5.3. Construction -----	5
6.Minéralogie des tufs volcaniques et utilisations-----	6
a. Feldspaths-----	6
b. Micas -----	6
7. Classification des tufs-----	6
7.1. Tufs Calcaires-----	6
7.2. Tufs calcaire en Algérie -----	7
8. Tufs Zéolithiques-----	7
8.1. Zéolithes -----	7
9.Types des zéolithes-----	8
9.1. Zéolithes naturelles (définition et formation géologique) -----	8
9.2. Zéolithes synthétiques -----	9
10. structure des zéolithes -----	10
11. Propriétés physico-chimiques et applications des zéolithes -----	11
11.1. L'échange ionique -----	11
11.2 L'adsorption -----	12
11.3. La séparation -----	13
11.4. La catalyse hétérogène -----	13
12. tuf et zéolithe dans le domaine de construction-----	14
13. Utilisation dans les ciments-----	14
Conclusion -----	15
<u>Chapitre 2</u>	<u>Processus de fabrication des ciments à Ain Kbira</u>
1.Introduction -----	15
2. Définition du ciment -----	15
3.Cimenterie de Ain Kebira -----	16
3.1. Situation géographique -----	16

4. Géologie générale-----	17
4.1. Pétrographie et tectonique du gisement de calcaire-----	17
4.1.1. Observation sur la pétrographie des matières premières-----	17
4.1.2. Tectonique-----	18
4.2. Emplacement du gisement dans la tectonique régionale-----	18
4.3. Tectonique spéciale du gisement du calcaire-----	18
a. Structure plissée-----	18
b. Failles-----	18
5. Hydrologie du gisement-----	18
6. Chaîne de fabrication de ciment-----	18
6.1. Extraction de la matière première-----	18
6.2. Préparation des matières premières-----	19
a. Concassage de la matière première-----	19
b. Concasseur à percussion-----	19
c. Concasseur à impact-----	20
6.3. Pré homogénéisation de la matière première-----	20
6.4. Broyage de cru-----	21
6.5. Homogénéisation de la matière première-----	21
6.6. Cuisson de la matière première-----	21
7. Clinker-----	22
7.1. Refroidissement du clinker-----	23
7.2. Broyage de clinker-----	23
7.3. Principaux constituants du clinker-----	24
8. Types des ajouts-----	24
8.1. Le gypse (CaSO ₄)-----	25
8.2. Ajout minérale actif-----	25
8.3. Les laitiers de haut-fourneau-----	25
8.4. Les cendres volantes-----	26
8.5. Les fumées de silice-----	26
8.6. Les pouzzolanes-----	26
9. Réactions chimiques-----	27
10. Types de ciment-----	27
10.1. Les ciments Portland-----	27
A. Le ciment Portland CEM I-----	27
B. Le ciment Portland composé : CEM II/A ou B-----	28
C. Le ciment de haut fourneau : CEM I-----	28
D. Le ciment au laitier et aux cendres : CEM V/A ou B-----	28
10.2. autres ciments-----	28
A. Ciment prompt naturel (CNP) NF P 15314-----	28
B. Ciment alumineux fondu (CA) NF P 15315-----	28
C. Ciment à maçonner (CM) NF P 15307-----	28
D. Le ciment blanc-----	28
10.3. CIMENT PETROLIER-----	28
11. Domaine d'utilisation-----	29

Conclusion-----	30
<u>Chapitre 3</u>	<u>Application de tuf volcanique dans le béton</u>
Introduction-----	35
1. Techniques analytiques utilisées -----	35
1.1.. Analyses chimiques par FX -----	35
1.2. Analyses par diffraction des rayons X (DRX) -----	36
2.Matière première -----	37
2.1. Tuf volcanique-----	37
2.2. Le ciment-----	37
2.3. Le sable-----	37
2.4. L'eau -----	38
3.Caractéristique des matières premières -----	38
. Préparation des éprouvettes -----	39
5.Essai de temps de prise -----	41
6.Essai mécanique -----	45
6.1. Résistance à la Flexion -----	45
6.2.Résistance à la compression-----	45
Conclusion-----	47
Essai de temps de prise-----	43
5. Essai mécanique -----	44
a. Résistance à la Flexion -----	45
b. Résistance à la compression -----	46
4.Essai de temps de prise -----	47
4.a. Tempe de pris -----	47
4.b. Pour mesurer le temps de prise il faut-----	48
5.Essai mécanique -----	50
5.a. Résistance à la Flexion -----	51
5.b. Résistance à la compression -----	53
*But de l'essai -----	53
* Principe de l'essai-----	53
*Conduite de l'essai-----	53
*La résistance à la compression a pour expression-----	53
6.Essai de la densité de tuf volcanique -----	55
7.Essai de stabilité à chaud -----	55
8.sesai de surface spécifique baleine : (SSB) -----	56
Conclusion générale-----	57

Liste des tableaux

Tableau 1 : Principales applications des zéolithes dans l'échange ionique.

Tableau 2 : Composition chimique en oxydes d'un ciment ordinaire et notation cimenterie.

Tableau 3 : Composition minéralogique du ciment.

Tableau 4 : Caractéristiques chimique d'un ciment pétrolier classe G.

Tableau 5 : Composition chimique du ciment utilisé, obtenu par analyse par FX

Tableau 6 : Composition chimique du tuf volcanique utilisé, obtenu par analyse par FX

Tableau 7 : Eprouvette 4×4×16 de mortier préparé

Tableau 8 : Variation de la hauteur en fonction du temps pour 0% témoin

Tableau 9 : Variation de la hauteur en fonction du temps pour 10%

Tableau 10 : Variation de la hauteur en fonction du temps pour 15%

Tableau 11 : Variation de la hauteur en fonction du temps pour 20%

Tableau 12 : Résultats récapitulatifs de début et fin de prise.

Tableau 13 : Résultats des mesures de la résistance à la flexion

Tableau 14 : Résultats des mesures de la résistance à la compression

Liste des figures

Figure 1 : Tuf volcanique.

Figure 2 : Schéma explicatif de formation du tuf volcanique.

Figure 3 : Minéral de la zéolite naturelle (chabasite).

Figure 4 : Structure des zéolithes

Figure 5 : Domaines d'application des zéolithes

Figure 6 : Localisation de la cimenterie Ain El Kebira.

Figure 7 : Extraction de la matière première.

Figure 8 : Etape de concassage.

Figure 9 : Broyeur à boulet

Figure 10 : Schéma de différentes étapes de la fabrication du ciment en voie sèche.

Figure 11: Les réactions chimiques lors de la clinkérisation.

Figure 12 : Appareil d'analyse chimique par FX

Figure 13 : Sable normalisé

Figure 14 : Diffractogramme DRX de tuf volcanique

Figure 15: Malaxeur automatique

Figure 16 : Eprouvette préparées sur des moules 4*4*16

Figure 17 : Moule tronique

Figure 18 : Prisomètre

Figure 19 : Variations de la hauteur de l'aiguait en fonction du temps de prise

Figure 20 : Histogramme du temps de début fin de pris

Figure 21: Presse pour essais mécaniques

Figure 22 : Eprouvettes durcies à différents âges

Figure 23: Variation de la résistance à flexion en fonction du % de tuf.

Figure 24 : Variation de la résistance à la flexion en fonction des taux de tuf volcanique.

Figure 25: Variation de la résistance à compression en fonction du % de tuf.

Figure 26 : Variation de la résistance mécanique à la compression en fonction du taux de tuf volcanique.

Liste des abreviations

KHD : Klochner-Humboldt-Deutz AG – KHD, est un fabricant allemand historique et pionnier de moteurs limitée.)

CRS : Ciment résistant aux sulfates.

GICA : Groupe industriel des ciments d'Algérie.

FX : Florance X

DRX : Analyse par diffraction par rayons X.

CPA : Ciment Portland artificiel.

CEM : Ciment Portland.

CaO: Chaux.

Fe₂O₃ :L'oxyde de fer.

CaSO₄: Gypse.

SiO₂: Silice.

C₃A: L'aluminate tricalcique.

C₂S : Le silicate bicalcique.

C₃S: Le silicate tricalcique.

C₄AF : L'alumino-ferrite tétracalcique.

Ø : Taille des boulets de broyeur.

Grace à ses diverses caractéristiques et propriétés, et sa richesse en différents composants minéraux et sa facilité d'exploitation, le tuf est l'un des substances naturelles et industrielles qui trouve ces derniers temps, de larges applications comme matériau local et industriel, et il contribue largement au développement de différentes unités de production industrielles et agricoles locales. Leurs domaines d'utilisation est polyvalent : ciments et produits cimentaires, fabrication des céramiques, travaux publics et construction (chaussées, barrages, bâtiments, etc.), adsorption et dépollution, catalyses et fertilisation de sol, etc....

Le ciment, L'écosais ASPDIN prit un brevet d'invention en 1824, sur la fabrication d'un liant à partir d'un mélange de chaux et d'argile qu'il appela ciment de portland à cause de l'aspect présenté par ce liant durci qui rappelait celui de la pierre calcaire de la presqu'île de Portland. Aujourd'hui, ce matériau est devenu le matériau du 20^e siècle.

Dans ce travail, nous tentons à évaluer l'utilité de la valorisation de tuf volcanique riche en zéolithes, dans le béton. Pour ce faire, notre étude reposera principalement sur une partie théorique consacrée à l'étude bibliographique des tufs volcaniques zéolithiques et une partie expérimentale pour l'évaluation de l'effet de tuf sur les propriétés mécaniques du biton, effectués au niveau de laboratoire de la cimenterie de Ain kebira.

Pour atteindre ces objectifs, nous avons structuré notre mémoire en trois chapitres, comme suit :

Le premier chapitre concerne, en premier lieu, la recherche bibliographique pour avoir les informations nécessaires sur les tufs volcaniques et zéolithiques, leurs origines et modes de formations, leurs propriétés et domaines d'application.

Le second chapitre est une présentation géographique et géologique du site de stage (cimenterie de Ain kebira), ou-il a été également évoqué le processus de production du ciment de la carrière jusqu'à le ciment comme produit fini.

Le dernier chapitre concerne la partie expérimentale ; qui décrit les méthodes et matériels utilisés, les essais de valorisation de tuf dans le béton, ainsi que la discussion des résultats obtenus.

Le travail terminera par une conclusion générale, qui récapitule les principaux résultats obtenus et les recommandations proposées.

1. Introduction

Les tufs sont des roches non homogènes poreuses, friables, et légères souvent pulvérulentes soit d'origines zéolithe issus de sources ou rivières dites pétrifiante ou la présence d'une riche végétation accélère le dépôt de calcaire, soit d'origine volcanique, agrégats qu'on trouve sous forme strates grossière, souvent sous une mince couche de terre. Les tufs peuvent offrir des couleurs très variées selon les éléments qui les composent. [1]

2. Définition de tuf

Nom générique des pierres poreuses produites par voie de sédiment ou d'incrustation, provenant de matières pulvérulentes remaniées et tassées par l'eau, et qu'on trouve assez souvent au-dessous de la bonne terre, de la terre franche. Tuf calcaire, siliceux, volcanique, etc. Particulièrement, sorte de pierre blanche et tendre, qui devient plus dure et plus blanche lorsqu'elle est employée. [1]

Les tufs volcaniques sont des produits de projections volcaniques, lapillis ou cendres, stratifiés par l'action de l'eau. Le tuf volcanique est une roche généralement tendre, non homogènes poreuses, friables, et légères souvent résultant de la consolidation de débris volcaniques, généralement de taille inférieure à quatre millimètres, sous l'action de l'eau et formant un conglomérat. [1]

La structure des tufs est poreuse (de 40 à 70 %), sa masse volumique est de 1250 à 1350 kg/m³, la résistance à la compression est comprise entre de 8 à 19 MPa et le coefficient de conductibilité thermique allant de 0,21 à 0,33 W/m C°. [1]



Figure 1 : Tuf volcanique de Remila. [1]

3. Formation des tufs volcaniques

Les tufs volcaniques sont des roches formées par l'accumulation de projection volcanique en fragments de quelques millimètres (roches pyroclastiques à lapillis dominantes), pouvant contenir des blocs ou des cendres, ces dernières pouvant voyager sur des centaines de kilomètres et de retomber sur le sol sous forme de pluie de cendre. Les fragments éjectés, sous l'effet de la compaction et par la cimentation, ils sont consolidés pour former une roche que l'on nomme de tuf.

Les tufs volcaniques se montrant en niveaux généralement bien stratifiés, dans lesquels on peut observer deux types de classement granulométrique :

- Classement vertical : la base est plus grossière que le sommet (ce dernier étant plus riche en cendres).
- Classement horizontal : les tufs sont de plus en plus fins lorsque l'éloignement du cratère augmente. [2]

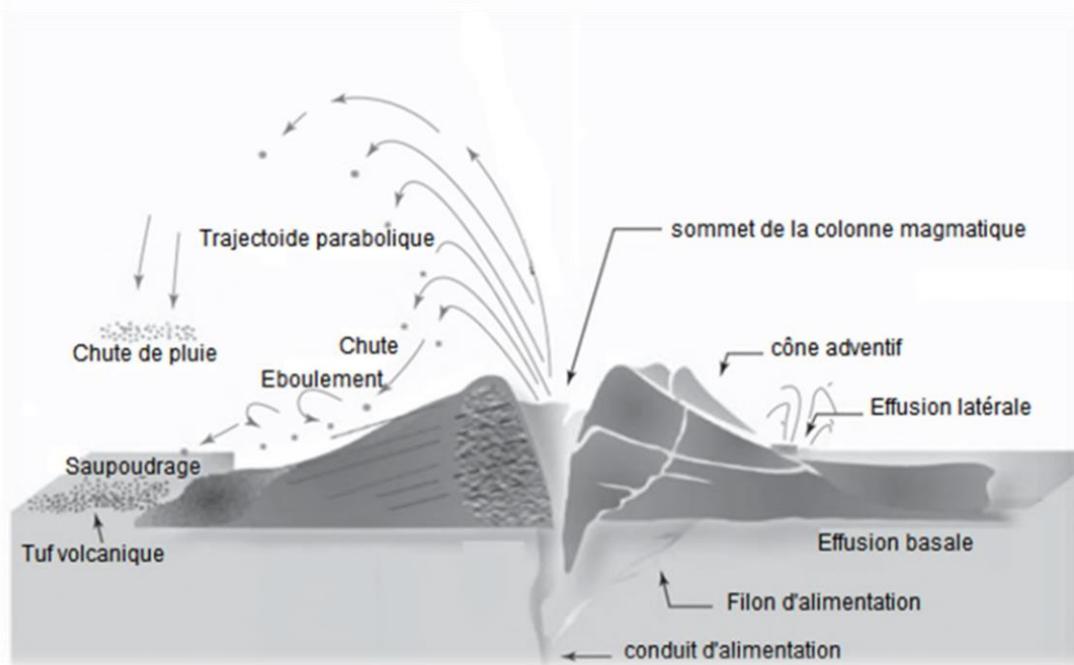


Figure 2 : Schéma explicatif de formation du tuf volcanique. [2]

4. Types des tufs

A. Tufs soudés : les tufs soudés sont des roches pyroclastiques, qui sont assez chauds au moment du dépôt pour se souder ensemble. Les tufs soudés peuvent être formés à partir des retombés, ou déposés à partir des courants de densité pyroclastiques, comme dans le cas d'ignimbrites. Lors du soudage, les éclats de verre et les fragments de pierres ponce s'adhèrent ensemble, se déforment, et se compactent. [3]

B. Tufs rhyolitiques : les tufs rhyolitiques contiennent les fragments de la pierre ponce, des fragments vitreux et scories avec du quartz, feldspath alcalin, de biotite, etc.

L'Islande, la Hongrie, l'ouest américain, et la Nouvelle-Zélande, sont parmi les régions où ces tufs sont prédominants. [3]

C. Tufs trachyte : tufs trachytiques contiennent peu ou pas de quartz, mais beaucoup de la sanidine ou l'anorthose et parfois l'oligoclase feldspath, de biotite, augite et hornblende occasionnels. Dans les intempéries, ils changent souvent d'argile rouge ou jaune-pierres, riches en kaolin avec le quartz secondaire. [3]

D. Tufs andésitiques : leur couleur ils sont rouges ou brunes ; leurs fragments de scories sont de toutes tailles à partir d'énormes blocs jusqu'à la poussière granuleuse. Les cavités sont remplies avec de nombreux minéraux secondaires, comme la calcite, chlorite, quartz, d'épidote, la calcédoine, mais dans les coupes microscopiques, la nature de la lave d'origine peut presque toujours être faite à partir des formes et des propriétés des petits cristaux qui se produisent dans la base décomposée vitreux. [3]

E. Tufs basaltiques : les tufs basaltiques sont répandus tant dans le district où les volcans sont maintenant actifs et dans les terres où les éruptions ont depuis longtemps terminé, ils sont noire vert foncé ou de colure rouge, ils varient grandement dans la grossièreté, certain état plein de ronde bombe spongieuse un pied ou plus de diamètre ou état souvent sous-marine, peut contenir de schiste, gris et autre matériaux sédimentaires, ils sont occasionnellement fossilifères. En particulier lorsque les laves contiennent la néphéline ou la lucite, sont souvent riche en zéolites. [3]

F. Tuf ultramafiques : les tufs ultramafiques sont extrêmement rares, leurs caractéristiques est l'abondance d'olivine ou de serpentine et de la rareté ou l'absence de feldspath et de quartz. De rares cas peuvent inclure les dépôts surface inhabituelle de kimberlites. La roche principale de kimberlite est un bleu – vert foncé serpentine riche en brèche. Ces brèches ont mis en place en mélange de gaz – solide. En profondeur, une certaine qualité de kimberlite brèche dans des profondes de digues faites de roche nom fragmentés. A la surface, les tufs ultramafiques peuvent survenir dans les dépôts. Les kimberlites sont la source les plus communes ignées de diamants. [3]

5. Domaines d'application

Le tuf volcanique se caractérise par structure poreuse, homogène et léger. Généralement les tufs sont riches en silice avec un pourcentage compris entre 50 % - 70 %. Les tufs trouvent certaines applications pour leurs caractéristiques physicochimiques (porosité, densité, composition chimique, etc.) notamment dans :

5.1. L'agriculture : le tuf volcanique poreux est un support d'agrégats en phosphates d'intérêt agronomique. Les matériaux fertilisants phosphatés synthétisés par réaction entre l'acide phosphorique et un tuf volcanique ou mélange tuf volcanique [4].

Nous signalant aussi que les tufs sont utilisés pour le drainage, l'amendement des sols comme substrat.

5.2. Industrie : les tufs volcaniques sont utilisés dans la fabrication de ciment comme ajout, de béton léger et les parpaings comme constituant secondaire (la structure alvéolaire confère une faible densité au béton pour une qualité mécanique donnée), les boisseaux de cheminées, les filtres divers et fosses septiques. Ils se servent aussi, comme éléments de décoration.

Les tufs servent pour le sablage des routes verglacées, utilisés comme couches de base pour itinéraires routiers hors-gel (la porosité globale de tuf empêche la formation de lentilles de glaces et évite donc la mise en place de barrières de dégel). [5]

5.3. Construction : le tuf est un matériau très largement utilisé pour la construction de bâtiments dans les régions à forte activité volcanique et sismique. Le tuf contenant des zéolithes thermiquement instables a été largement utilisé comme matériau de construction

dans les zones d'activité volcanique et tectonique depuis plusieurs siècles, en dépit de sa faible résistance [6].

6. Minéralogie des tufs volcaniques et utilisations

Les différentes études sur les tufs volcaniques ont montré que les tufs volcaniques comme toutes les roches ignées sont riches en différents minéraux silicatés, nous définissons les principaux minéraux.

a. Feldspaths

Les feldspaths sont les constituants essentiels des roches magmatiques, plutoniques ou effusives (59,5 % des minéraux des roches magmatiques). Leur composition chimique varie avec la nature des roches : les roches acides renferment des feldspaths alcalins, les roches intermédiaires des feldspaths alcalins, et des plagioclases moyens, les roches basiques des plagioclases calciques. [11] Et la majorité des produits de nous utilisons quotidiennement sont fabriqués à base des feldspaths : talque, le verre des boissons, le verre de protection, la laine de verre pour l'isolation, la vaisselle dans laquelle nous mangeons, etc.

b. Micas

Les micas sont des silicates hydratés, plus ou moins alumineux et presque toujours potassiques, qui contiennent en proportion variable du fer et du magnésium. Ils appartiennent à la famille des phyllo silicates et sont monocliniques.

Le mica est utilisé pour ses propriétés de résistance au feu, son inertie chimique, son pouvoir couvrant, sa capacité d'isolation acoustique. Sous cette forme il est utilisé comme charge dans des peintures, des enduits, des matières plastiques (pour sa résistance à la traction et à la flexion). Il est également utilisé pour ses propriétés d'isolant électrique et de résistance à la chaleur.

7. Classification des tufs

Le tuf volcanique, appelé anciennement tuf lithoïde, les grecs employaient le tuf volcanique de l'île de Santorin, par contre les romains se servaient d'un tuf volcanique rouge.

Les romains ont beaucoup plus préféré un type de roche, d'où le nom de pouzzolane sous lequel était alors connu tout matériau ayant des propriétés comparables.

Pour son abondance et la facilité de son extraction et de sa taille, le tuf est, au moins depuis les Étrusques et les Romains, un des matériaux les plus employés dans la construction des bâtiments publics et privés. [2]

7.1. Tufs Calcaires

Les tufs ou bien la croûte calcaire est un matériau composé essentiellement, mais pas exclusivement de carbonates de calcium. Les croûtes existent à l'état poudreux, nodulaire ou très induré ; elles sont dues à la cimentation, à l'accumulation ou au remplacement de quantités plus au moins grandes de sols, roches ou matériaux altérés par du calcaire dans une zone d'infiltration.

Les tufs calcaires sont des roches calcaires ayant un Los Angeles supérieur à 60, une masse volumique inférieure à 2 t/m³, une résistance à la compression simple compris entre 5 et 10 MPa, et dont la teneur en éléments fins passant au tamis de 80 microns, obtenus sur la fraction 0/20 du matériau après extraction, est de l'ordre de 10 à 20 %.

En fait cette description peut s'appliquer à d'autres roches tendres calcaires exemple (craies), les tufs se différencient alors de ces dernières par leur mode particulier de formation.

8. Tufs zéolithiques

Dans le cas des zéolithes naturelles, les minéralogistes ont adopté la méthode qui consiste à donner à la roche le nom du minéral dont elle se compose majoritairement à condition qu'elle en contienne au moins 50%. Ainsi on nommera clinoptilolithe, mordénite ou chabazite toute roche composée au moins à moitié d'un de ces minéraux de la famille des zéolithes.

Comme pour toute matière naturelle, il n'existe pas de constance de qualité d'un lieu à un autre. La pureté varie presque toujours d'un gisement à un autre, c'est pourquoi on peut trouver sur le marché des matériaux contenant de 55 à 85% de zéolithe (Ex : clinoptilolithe)

Les autres minéraux qui composent la roche que l'on pourrait qualifier « d'impuretés » ont une importance capitale. Selon leur nature et leur concentration elles conditionnent la roche et son champ d'application. Par exemple, on peut trouver deux roches issues de deux gisements présentant une teneur identique en une même zéolithe mais inapplicable dans les mêmes domaines. On parlera de tuf zéolithique dans le cas d'une roche ne contenant pas plus de 50% d'une zéolithe donnée [7].

8.1. Zéolithes

Les zéolithes sont des aluminosilicates cristallisés poreux, dont le réseau ou charpente zéolithique est construit par l'enchaînement tridimensionnel d'unités élémentaires tétraédriques, SiO⁴ et AlO⁴ liés par leurs sommets conformément à la règle de

Lowenstein qui dit que deux tétraèdres AlO_4 ne peuvent pas être consécutifs à l'intérieur de la charpente.

9. Types des zéolithes

Les zéolithes peuvent être naturelles ou synthétiques. Plus de (250) types de zéolithes ont été synthétisées et (48) zéolithes naturelles sont connues.

9.1. Zéolites naturelles

Les zéolithes minérales (ou naturelles) sont considérées comme des constituants mineurs des roches basaltique et volcanique. Elles se forment sur des terrains où les roches et les cendres volcaniques ont réagi avec les eaux souterraines alcalines et aussi dans les couches de dépôts organiques des bassins superficiels. Cette formation dure plusieurs centaines ou milliers d'années. Les zéolithes naturelles sont très rarement pures car elles sont généralement contaminées à divers degrés par d'autres minéraux métalliques, du quartz ou d'autres zéolithes. Pour cette raison, les zéolithes naturelles sont exclues de beaucoup d'applications industrielles où l'uniformité et la pureté sont essentielles. Des zéolithes ont même été trouvées sur Mars [8].

À la fin des années 1950, les découvertes géologiques majeures révèlent l'ampleur des gisements de zéolithes naturelles dans les dépôts sédimentaires aux États-Unis d'Amérique. Ainsi, quelques zéolithes présentes en quantités importantes et très proches de dépôts minéraux d'importance commerciale, commencent à être commercialisées comme adsorbants. On exploite donc la chabazite, l'érianite, la mordénite et la clinoptilolite en quantité industrielle.

Le Japon devient le plus gros utilisateur des zéolithes naturelles. La mordénite et la clinoptilolite sont utilisées comme adsorbants dans les opérations de séparation, de déshydratation et de purification de l'air. Les zéolithes naturelles trouvent aussi des applications dans l'industrie papetière, dans les ciments et les bétons, dans les engrais et comme compléments alimentaire pour le bétail. Cette dernière application représente le plus gros débouché en volume pour les zéolithes naturelles.



Figure 3 : Minéral de la zéolite naturelle (Chabazite). [8].

9.2. Zéolithes synthétiques

Les zéolithes synthétiques présentent l'avantage d'être très pures et de structure uniforme. Ces paramètres sont extrêmement importants pour certaines applications telles que les utilisations catalytiques en lit fluidisé (pour l'industrie pétrolière en particulier). Il est également possible de fabriquer des structures zéolithiques naturellement inconnues et qui permettent de maximiser l'efficacité de l'opération pour laquelle elle est destinée.

Les travaux de Barrer, dans le milieu des années 1940, poussent R.M. Milton à s'intéresser à l'étude de la synthèse de zéolithe et à la recherche de nouvelles techniques de séparation et de purification de l'air. Entre 1949 et 1954, R.M. Milton et D.W. Breck découvrent un nombre significatif de zéolithes commercialement intéressantes, les zéolithes A, X et Y. Ainsi, en 1954, Union Carbide commercialise pour la première fois des zéolithes synthétiques comme une nouvelle classe de matériel industriel servant à la séparation et à la purification. Les premières applications concernent donc la déshydratation des gaz réfrigérants et du gaz naturel.

En 1959, l'Union Carbide commercialise un procédé pour la séparation des isoparaffines basé sur l'utilisation de zéolithes : cela représente la première utilisation industrielle utilisant les caractéristiques de « tamis moléculaire » des zéolithes. La même année, l'Union Carbide commercialise une zéolithe de type Y comme catalyseur pour les réactions d'isomérisation, ce qui constitue la première utilisation industrielle utilisant les caractéristiques catalytiques des zéolithes [9].

10. Structure des zéolithes

Les zéolithes sont des aluminosilicates cristallisés poreux dont le réseau ou charpente zéolithique est construit par l'enchaînement tridimensionnel d'unités élémentaires tétraédriques, SiO_4 et AlO_4 liés par leurs sommets conformément à la règle de Lowenstein qui dit que deux tétraèdres AlO_4 ne peuvent pas être consécutifs à l'intérieur de la charpente (figure 4). [10]

Ces enchaînements conduisent à des unités de construction plus complexes appelées unités secondaires, qui en s'assemblant, forment un réseau poreux régulier contenant des cavités (ou cages) et/ou des canaux de dimensions calibrées. Chaque type de zéolithe présente une distribution de taille de pores étroite et spécifique qui leur confère des propriétés de tamis moléculaires très utilisées en adsorption (sélectivité de taille). Chaque atome d'aluminium de la charpente induit une charge négative délocalisée sur le cristal qui est neutralisée par la présence de protons ou de cations en position extra-charpente (cations de compensation), d'où les propriétés d'acidité dans le cas des H^+ et d'échange ionique sinon (adoucissement de l'eau) des zéolithes. Plus la zéolithe contiendra d'aluminium (limite $\text{Si}/\text{Al}=1$), plus le nombre de cations et/ou protons augmentera et simultanément son caractère hydrophile. [11] [12].

Ces particularités structurales spécifiques, c'est-à-dire leur structure en cage à 1,2 ou 3 dimensions ou en canaux, mais aussi le rapport silicium/aluminium (Si/Al) de la charpente et la présence de cations mobiles, sont responsables des propriétés physicochimiques de ces composés.

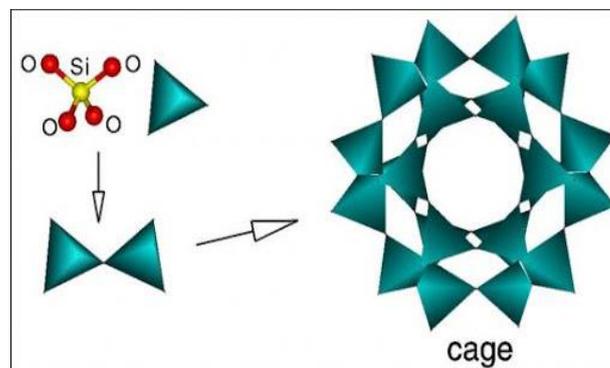


Figure 4 : Structure des zéolithes [10]

Les zéolites sont nombreuses et variées dans leurs structures et leurs propriétés. Mais elles répondent toutes à la formule générale ci-dessous.



Avec :

M : Cation alcalin ou alcalinoterreux, (Na, K, Ca, Mg) ;

n : Valence du cation

x : Nombre entre 0 et 10

y : Nombre entre 2 et 8

11. Propriétés physico-chimiques et applications des zéolites

La cristallinité, la gamme de tailles et de formes des pores existante, le large panel de compositions chimiques possibles, font que les zéolites ont trouvé leur place dans un grand nombre de procédés. La production mondiale atteint actuellement 4 millions de tonnes par an. Les zéolites sont utilisées comme échangeurs d'ions. Par exemple, suite au désastre de Tchernobyl en 1986, une quantité importante de zéolites naturelles a été utilisée pour l'encapsulation de déchets radioactifs (^{137}Cs) [13], dans des procédés de séparation (n-paraffines et iso-paraffines) et de stockage (stockage de l'hydrogène par exemple) ou en tant que catalyseur.

11.1. Échange ionique

La principale application industrielle des zéolites est l'échange ionique. Les tonnages utilisés sont nettement supérieurs à ceux des applications en adsorption et catalyse [14]. La capacité d'échange d'ions des zéolites est due à la présence dans la charpente minérale d'espèces divalentes ou trivalentes qui substituent partiellement les atomes de silicium. L'aluminium est l'hétéro-élément le plus utilisé. Sa présence induit une charge négative au sein de la charpente minérale ; cette dernière est neutralisée par des cations de compensation (cations alcalins, alcalino-terreux, cations ammonium, cations ammonium quaternaires occlus dans les canaux et les cavités de la structure zéolithique. Les principales utilisations sont :

- Déminéralisation des eaux.
- Récupération des métaux nobles.
- Dépollution des effluents aqueux.

- Coagulation des saignements graves.
- Accroissement de l'acidité pour la catalyse.
- Fertilisation des sols.

Tableau 01 : Principales applications des zéolithes dans l'échange ionique.

Applications	Zéolithes (type structural)	Rôles
Détergence	Zéolithes A (LTA) et Zéolithe P (GIS)	Adoucissement de l'eau
Traitement des effluents d'origine nucléaire	Mordénite (MOR) Clinoptilolite (HEU)	Rétention $^{137}\text{Cs}^+$, $^{90}\text{Sr}^{2+}$
Traitement des eaux usées	Clinoptilolite (HEU) Phillipsite (PHI) Chabasite (CHA)	Rétention eaux
Agriculture	Clinoptilolite (HEU) Phillipsite (PHI) Chabasite (CHA)	Régulateur de pH

11.2. Adsorption

Les zéolithes font partie de la classe des adsorbants microporeux, elles présentent des caractéristiques qui leur sont propres telles que : des fenêtres d'accès à la microporosité de dimension constante et uniforme. De plus elles possèdent un grand volume poreux.

La présence de pores de taille fixe détermine la sélectivité à l'entrée des pores et aussi au niveau des cages internes lorsqu'elles sont présentes. Ces propriétés d'adsorption sont utilisées dans : [15]

- La déshydratation et la purification des gaz et des liquides (régulation de l'humidité dans les doubles vitrages).
- Elimination de H_2S des fumées d'usines.
- Elimination des produits sulfurés présents dans certaines fractions pétrolières.
- Séchage des gaz.
- Séchage des solvants organiques.
- Séchage d'enceinte pour vide poussé.
- Séchage dans les réactions inhibées par l'eau.

11.3. Séparation

Les propriétés de séparation des zéolithes sont beaucoup plus utilisées en pétrochimie pour séparer différentes fractions pétrolières. Parmi les procédés utilisés, le plus connu est la séparation des n-paraffines dans un mélange contenant des n et iso-paraffines sur la zéolithe 5A (LTA) [10]. La zéolithe Ca-A (LTA) est capable de séparer un mélange de n-hexane et 3-méthyl-heptane. Un autre exemple est celui de la séparation d'un mélange de para et méta xylène sur la zéolithe HZSM-5 (MFI) [16].

La séparation de l'azote et de l'oxygène de l'air sur la zéolithe et la production de l'oxygène de qualité médicale.

11.4. Catalyse hétérogène [13] [14].

Les propriétés acides des zéolithes et leurs caractéristiques structurales qui leur confèrent des propriétés de sélectivité de forme, font que ces matériaux sont largement utilisés dans les procédés de catalyse hétérogène. Depuis les années 1960, le domaine de la synthèse de produits organiques catalysés au travers de zéolithes et de matériaux microporeux apparentés ne cesse de croître.

Ainsi, l'industrie pétrolière profite largement de ces propriétés pour la valorisation des fractions du pétrole lors de son raffinage. La fraction d'essence peut être augmentée par craquage d'hydrocarbures et l'indice d'octane peut croître par formation de produits branchés (alkylation, craquage, hydrocraquage, isomérisation...). La transformation du méthanol en essence et en oléfines est également possible au moyen de réactions catalysées par des zéolithes. [17][15] [16]

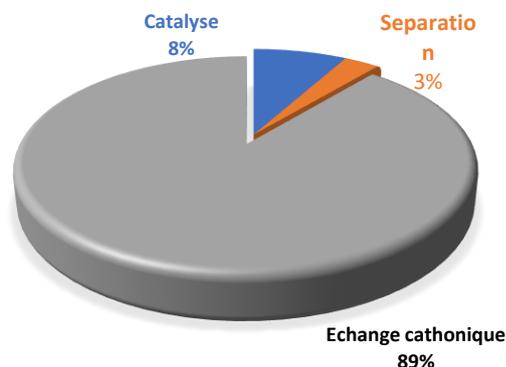


Figure 5 : Domaines d'application des zéolithes [17]

12. Tuf et zéolithe dans le domaine de construction

Beaucoup de recherches ont concerné l'étude de l'activité pouzzolanique des zéolithes naturelles en utilisant différentes analyses et tests de pouzzolanité. Généralement, les composants réactifs des matériaux pouzzolaniques, tels que les cendres volantes, la fumée de silice et les pouzzolanes naturelles, sont vitreuses ou amorphes. Dans le cas des zéolithes naturelles, bien que sont des matériaux cristallins, peuvent agir comme des matériaux pouzzolaniques. Il a été constaté que la zéolithe naturelle semble être un excellent additif des matériaux cimentaires. La grande quantité de SiO_2 et Al_2O_3 réactifs dans la zéolithe se combine chimiquement avec l'hydroxyde de calcium, produit par l'hydratation du ciment, pour former d'autres gels tels que les silicates calciques hydratés (C-S-H) et les aluminates calciques hydratés (C-A-H). Il en résulte une amélioration de la microstructure de ciment durci et donc une augmentation de la résistance mécanique et de la durabilité des matériaux cimentaires [18-25].

Des chercheurs en Grèce ont montré que la zéolithe naturelle, provenant de la zone Metaxades en Grèce, est pouzzolanique. Cette zéolithe examinée est composée principalement de heulandite de type II qui est minéral pouzzolanique du fait qu'il contribue au développement de la résistance mécanique des pâtes des mélanges zéolithe-ciment. La réactivité chimique de cette zéolithe a été évaluée par l'essai « Chapelle » qui a montré une grande consommation de la portlandite $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ résultant de l'hydratation du ciment Portland, ce qui conduit à la formation de plus de gel C-S-H et C-A-H responsable du développement de la résistance mécanique. L'activité pouzzolanique de cette zéolithe naturelle a été confirmée par ces chercheurs qui ont étudié l'effet du pourcentage de l'ajout (de 0 à 20%) sur le développement de la résistance mécanique. Ils ont montré que l'addition jusqu'à 20% de zéolithe n'affecte pas significativement les propriétés physiques et mécaniques des ciments composés. Cette activité pouzzolanique a été aussi confirmée par d'autres analyses ((infrarouge FTIR, diffraction des rayons X (DRX) et analyse thermique (ATD-TG)), en suivant la vitesse d'hydratation du mélange ciment-zéolithe naturelle. [26-27].

D'autres travaux ont essayé d'expliquer l'origine de l'activité pouzzolanique des zéolithes naturelles et sa relation avec leur composition minéralogique. Cette activité est attribuée à la grande surface spécifique de la zéolithe due à sa structure en forme de cage et sa porosité. Les zéolithes de type « Heulandite » sont parmi celles les plus abondantes dans la nature et les

plus utiles, dont le rapport Si/Al varie de 3 à 5. Les travaux antérieurs sur la réactivité pouzzolanique des zéolithes de type heulandite, clinoptilolite et mordénite, ont montré que les minéraux zéolithiques sont capables de réagir avec de la chaux et à produire les phases hydratées du ciment.

Conclusion

Le tuf est une substance de grande importance, est utilisée à l'état brute dans divers domaines industriels, lorsqu'ils présentent des caractéristiques minéralogique et structurales bien déterminer, son utilisation s'tale vers des domaines plus complexes, telle que l'industrie pharmaceutique et chimique.

Cette caractérisation a été faite selon la méthodologie présentée dans le chapitre suivant, avec tout d'abord le contexte géologique du tuf ensuite méthodes et outils de caractérisation physico-chimiques.

1. Introduction

Les liants inorganiques ont eu un rôle important dans l'industrie de la construction depuis de nombreux siècles, sont classifiées aujourd'hui comme ciment, chaux et plâtres. Ces liants, utilisés parfois en tant que tels, sont souvent mélangés pour l'obtention d'un produit répondant aux caractéristiques techniques requises par l'utilisateur.

Au deuxième siècle, les Romains ajoutaient de la chaux à la pouzzolane pour améliorer ses propriétés hydrauliques, puis le mélangeaient avec des granulats pour obtenir le "bitume".

De nos jours, les différents types de liants sont bien connus, en particulier les ciments, et ils deviennent des produits de plus en plus sophistiqués, adaptés aux nécessités techniques particulières.

2. Définition du ciment

Le ciment est un produit moulu du refroidissement du clinker qui contient un mélange de silicates et d'aluminates de calcium porté à 1450 – 1550 °C, température de cuisson.

Elle est définie selon la norme NFP15301, comme une fine mouture inorganique qui gâchée avec l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit. Le ciment portland est constitué d'un mélange de clinker, de gypse et d'ajouts minéraux, le ciment est majoritairement composé de quatre phases anhydres. [1]

Tableau 2 : Composition chimique en oxydes d'un ciment ordinaire et notation cimenterie

Oxydes	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaSO ₄	H ₂ O	SO ₃
Composition %	50-70	5-10	15-30	5-10	0-5	0-2	0-5

Le ciment usuel est aussi appelé liant hydraulique, car il a la propriété de s'hydrater et de durcir en présence d'eau car cette hydratation transforme la pâte liante, qui a une consistance de départ plus ou moins fluide, en un solide pratiquement insoluble dans l'eau. Ce durcissement est dû à l'hydratation de certains composés minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium [2]. L'expression de « pâte de ciment durcissant » sera utilisée

pour désigner la pâte de ciment dans la transformation d'un état plus ou moins fluide en un état solide [3].

Le ciment ordinaire anhydre est constitué de clinker Portland, de gypse et éventuellement d'additions telles que les cendres volantes, le laitier granulé de haut fourneau, la fumée de silice, pouzzolanes naturelles..., etc. [4]

3. Cimenterie de Ain Kebira

La société des ciments d'Ain EL Kebira fabrique plusieurs types de ciments selon le domaine d'utilisation CRS...etc. ce groupe industriel des ciments d'Algérie (GICA) va se lancer dans la production de ciment pétrolier. Ce type de ciment qui était jusqu'à présent à 100% importé. Ce chapitre traite des généralités sur ce groupe industriel ainsi que sur le ciment pétrolier, on peut voir une description théorique sur la préparation de la matière première, sa classification et ses propriétés physico-chimiques.

3.1. Situation géographique

La cimenterie est située à 350 Km à l'est d'Alger, dans la localité de Ain El Kebira dont elle porte le nom et à 1000 mètres au-dessus du niveau de la mer (Figure 6).

L'usine de la cimenterie d'Ain El Kebira est située à une distance d'environ de 15 à 20 km du Nord-Est de Sétif. Les gisements de matières premières de DJEBEL MEDJOUNS sont montrés particulièrement convenables. Ce massif fait partie morphologiquement des montagnes du tell, par lesquelles le bassin de Sétif est située à la bordure Sud à une altitude comprise entre 1070 et 1100 m.

La partie centrale du bassin ne débute que dans le Sud de la ville à part quelques montagnes isolées, elle présente une morphologie peu accidentée avec des altitudes comprises entre 900 et 1000 m sur les plaines par contre les montagnes débutant à environ de 10 à 15 km au Nord de Sétif.

L'usine est installée à proximité d'une carrière dont les réserves lui permettent de faire face aux besoins d'exploitation à long terme, avec une durée de vie probable de ces carrières supérieure à 100 ans selon les dernières estimations. Couvrant une superficie de près de 220 hectares, elle tire les principales matières premières à partir du gisement de djebel Medjounés et d'argile « marne » de (Theniet Mouloutou) [5].

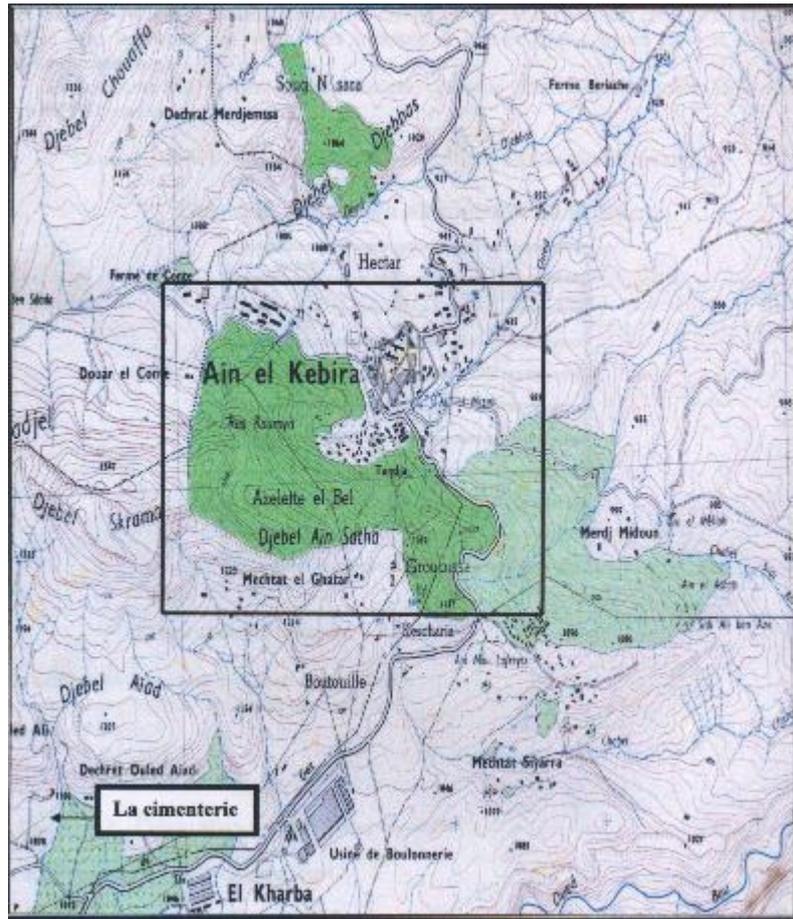


Figure 6 : Localisation de la cimenterie de Ain El Kebira (Extrait de la carte topographique Kharatta au 1/25000).

4. Géologie générale

4.1. Pétrographie et tectonique du gisement de calcaire

4.1.1. Observation sur la pétrographie des matières premières

Les calcaires continus dans les différents niveaux de la série calcaire principale, signalons sous le microscope une présence assez abondante de la calcite micro cristalline et quelques spécules d'éponge. La grosseur des cristaux de calcite est comprise entre 0,04 et 0,08 mm, une très faible teneur en dolomie, ambérite de proportion de 3% de SiO_2 représente sous forme de quartz originaire de gel. En outre, on observe aussi des traces de colophane, de feldspath, d'illite, de kaolinite et de géothermal.

4.1.2. Tectonique

4.2. Emplacement du gisement dans la tectonique régionale

Le gisement fait partie de l'anticlinale régionale du DJEBEL MEDJOUNES dans l'axe placement principal s'étend en sens "OSO" - "OSO" il repose sur le flanc "SO" de la voûte principale dont le pendage en direction ne dépasse pas les 30°, l'ensemble de cette structure plissée se trouve compliqué par quelques grandes et nombreuses petites failles.

4.3. Tectonique spéciale du gisement du calcaire

a. Structure plissée : La super position du grand pli par un 2° système de plis est particulièrement frappante dans le panneau "A" de gisement ; le sens de la direction des roches entre SE et S dans le domaine des sondages assez doucement vers le bord N du panneau "A" jusqu'à atteindre en fin la direction E.O, le pendage des couches également assez douce, diminue en général de 30 à 10°.

b. Failles : Le nombre de failles est considérable, mais des montants de déplacement notable ne s'observent que dans certains cas isolés. La faille, considérablement la plus important, est un effondrement que des cas isolés qui s'étend au sud de la zone d'écrite, à une distance d'environ 250 m et presque en parallèle avec ce dernier.

La majorité des failles et notamment des chevauchements, peut être réunies par groupes suivant le sens de leur direction, celle-ci correspondant, dans une grande ou très large mesure.

5. Hydrologie du gisement

Le contexte hydrogéologique du gisement favorisera l'exploitation. Des sources d'eau provisoires apparaissant pendant ou bien juste après les pluies ne devraient pas empêcher les travaux miniers. Les eaux s'évacueront facilement par gravitation hors de la carrière [6].

6. Chaine de fabrication de ciment [7]

6.1 Extraction de la matière première

C'est à la carrière à ciel ouvert qui se compose d'un seul gisement, en générale contiennent la marne et calcaire (Figure 7), elles sont exploitées respectivement par découpage et par abattage à l'explosif.

Ces deux matières premières sont transportées par camions à bennes jusqu'aux trémies des concasseurs. La marne argileuse caractérisé par sa friabilité et concassée dans un concasseur à percussion tandis que le calcaire, matière dure passe dans deux concasseurs à percussions.

A la sortie des deux concasseurs la granulation varie entre 0 et 25mm de diamètre puis ils sont envoyés par bandes vers les halls correspondantes. Dans le cas, où le taux d'humidité de la marne dépassé 10%, elle doit être sécher dans un sécheur avant l'envoi dans le hall de stockage.

Dans le hall de stockage ces deux matières premières subissent une pré-homogénéisation séparément avant de les envoyés par bondes vers les trémies correspondantes.



Figure 7: Extraction de la matière première.

6.2. Préparation des matières premières

a. Concassage de la matière première

Lorsque la matière première atteint les stations de concassage, elle est soumise à une première réduction de granulométrie. En effet, le concassage vise à créer une réduction de 1/10 de la taille des particules afin de trouver, à la sortie, des diamètres dont la valeur moyenne est de quelques centimètres. Pour réaliser cette réduction, plusieurs types de concasseurs peuvent être employés.

b. Concasseur à percussion

Le mode d'action principal de ces concasseurs est la percussion. Celle-ci peut être soit directe sous l'action d'outils métalliques tournant à grande vitesse, soit indirecte par projection des matériaux à très grande vitesse contre des plaques de choc formant des enclumes fixes.

c. Concasseur à impact

Le concasseur à impact est constitué de 1 ou 2 élément tournant, présents à l'intérieur d'une structure fixe. Ces « rotors » tournent à haute vitesse et sont munis de battoirs. La matière entrante dans le concasseur est alors frappée par les battoires en rotation et propulsée vers des zones d'impact. Ces dernières sont constituées de simples cylindres métalliques de diamètres différents qui fracassent la matière au moment de l'impact. Ces zones d'impact peuvent être déplacées et modifiées afin d'ajuster la granulométrie de la matière sortante. La réduction maximale possible de certains types de concasseur à impact est de 1/150.



Figure 8 : Etape de concassage.

6.3. Pré homogénéisation de la matière première

Lorsque le concassage a eu lieu, la matière est transportée par camions ou par convoyeurs vers l'étape du pré homogénéisation. A cet endroit, les particules de matière première sont déposées en couches successives de faible épaisseur. Les couches, qui sont ainsi superposées, forment, avec le temps, des amas de matière de grande taille qui sont ensuite destinés aux broyeurs à rouleaux. Le volume de matière ainsi emmagasiné permettra le fonctionnement de l'usine, en cas de besoin, pour une durée d'environ une semaine. La reprise de la matière

s'effectue perpendiculairement à la direction selon laquelle elle a été déposée, ce qui permet de créer un mélange préliminaire.

6.4. Broyage de cru

A l'aide de convoyeurs doseurs à bandes, on assure l'alimentation du broyeur en calcaire, marne et minerai de fer, le broyage-séchage de la matière s'effectue en une seule opération, ainsi le courant de gaz en provenance du four ou du foyer auxiliaire entre en contact avec la matière.

Une partie du produit broyé et déchargé et parvient à l'élévateur à godets par une airoglissière ; passe au séparateur dynamique, on assure une séparation jusqu'à une finesse de 14 à 16% de refus sur tamis 90m.

Le produit fini récupéré dans les cyclones de séparation ou séparateur est envoyé dans le pot de mélange puis vers les silos d'homogénéisation, les gros graviers sont ramenés vers le broyeur par l'intermédiaire du cône centrale du séparateur, pour être broyé jusqu'à une finesse désirée.

Les fines particules entraînées par le gaz de séchage subissent une séparation solide/gaz, celle s'effectue dans un séparateur statique puis dans un séparateur cyclone, la poussière non récupérée dans les étapes précédentes est éliminée presque totalement dans un électro-filtre, ou les particules subissent une polarisation en appliquant un champ électrique, les gaz aussi filtrés sont aspirés par un ventilateur vers l'atmosphère, la matière récupérée s'ajoute à celle en provenance du séparateur dynamique; puis passent dans un pot de mélange pour finir dans les silos de stockages et d'homogénéisation.

6.5. Homogénéisation de la matière première

A la sortie du broyeur, la matière possède une fine granulométrie mais ses caractéristiques demeurent encore relativement variées. L'étape suivante consiste alors à s'effectuer un mélange plus complet des particules de matière. Ceci est réalisé à l'aide d'un silo et de compresseurs. Les ventilateurs émettent un jet d'air dans lequel les particules demeurent suspendues plus ou moins longtemps en raison de la différence de taille ou de poids de ses dernières. Pendant cette suspension, les particules amorcent leur chute vers le fond du silo et un brassage s'effectue. Ce mélange de particules, relativement parfait peut ensuite être extrait du fond du silo et dirigé vers le four de cuisson [8].

6.6. Cuisson de la matière première

Le four rotatif est l'élément principal de l'installation de fabrication de clinker. Il est essentiellement constitué par un tube cylindrique dans lequel brûlent des substances combustibles injectées à fort débit en produisant une flamme de plusieurs dizaines de mètres de longueur. Il fonctionne comme un échangeur de chaleur contre-courant dans lequel la flamme, dirigée de l'aval vers l'amont, porte à hautes températures le cru qui progresse en sens inverse, le tube étant incliné vers l'aval de 3 à 4%. De tels fours ont une longueur de 30 à 100 mètres et un diamètre de 2 à 4 mètres. Pour améliorer le rendement thermique mais aussi pour utiliser la chaleur produite par la flamme, les gaz de cuisson, sortant du four, sont utilisés pour préchauffer le cru déposé à l'entrée du four. Ces échanges thermiques sont réalisés dans un système de cyclone séparateur et de gaines. A l'issue de cette étape de préchauffage.

L'emploi des foyers de pré calcination qui font passer les matières premières vers 800 à 900°C. Le cru se décarbonate alors (entraînant une consommation énergétique de l'ordre de 400Kcal/Kg), ce qui facilite l'étape de clinkérisation vers 1450°C au niveau du four rotatif. A l'aval du four, le clinker sort à une température 1450°C et tombe dans le refroidisseur, cette trempe rapide du clinker fige les phases formées (silicates et aluminates de calcium) à haute températures. Le clinker refroidi se présente alors sous forme de granules. Le ciment est obtenu par broyage des granules de clinker, avec addition d'environ 3 à 5% de gypse et éventuellement d'autres constituants.

7. Clinker

Le clinker se présente sous forme de nodules durs et cristallisés, de teinte gris foncé pour les ciments habituels et verte pour le clinker de ciment blanc [14]. C'est cet édifice cristallin du clinker que le broyeur devra fragmenter de la microstructure du clinker vont dépendre :

- La broyabilité, la composition minéralogique des différentes tranches granulométriques.
- Les propriétés physico-chimiques.
- La vitesse d'hydratation, la résistance mécanique, le retrait etc...
- La granularité d'un clinker broyé dépend aussi du type de broyeur.

Dans le broyeur à boulets au contraire, la granulométrie s'échelonne de 1 à 100 μm , les grains sont arrondis, recouverts de fines poussières.

7.1. Refroidissement du clinker

A la fin de la cuisson en aval du four, le clinker obtenu sort à une température comprise entre 1200 et 1450°C et tombe dans le refroidisseur. Ce refroidissement à l'air du clinker fige les phases formées à hautes températures (silicates et aluminates de calcium).

7.2. Broyage de clinker

Les opérations de broyage de clinker ont pour but d'accroître sa réactivité par augmentation de sa surface spécifique (et par création de défaut de cristaux en surface des grains). L'opération de broyage de clinker est effectuée dans grand broyeur cylindrique à boulets (broyeurs les plus généralement utilisés) Figure 10. [13]



Figure 9: Broyeur à boulet

A la sortie du four et après la trempe, les grains de clinker se présentent sous forme de granules allant de quelques millimètres à quelques centimètres de diamètre. A cette finesse, ces granules ne peuvent constituer un liant hydraulique efficace. Le clinker est donc broyé de manière à obtenir des particules de taille plus fines inférieures à 50 μm . Cette étape est donc très importante dans la fabrication du ciment car elle permet d'activer les propriétés physico-chimiques du matériau.

Les modes de broyage utilisés en cimenterie sont adaptés au caractère dur, fragile et abrasif du clinker [17][18].

Le broyage par percussion est réalisé à partir de l'énergie cinétique dans le milieu de broyage. Le choc réalisé entre les grains de clinker et les parois ou les projectiles présents dans le broyeur (boulets) permet de fragmenter les grains. Le broyage par frottement (ou attrition) s'effectue entre les grains de clinker présents dans le broyeur. Les forces appliquées sont généralement tangentielles à la surface de la particule.

Ce type de broyage permet d'obtenir de fines particules suite à l'érosion progressive des grains.

7.3. Principaux constituants du clinker [15] : Composition indicatrice en % pondéral :

- Silicate tricalcique (C₃S) : 3CaO, SiO₂, la cassure en éclats des grains de C₃S est en relation avec sa structure, plus ou moins élevée et souvent fissurée. C₃S est un matériau dur mais fragile.
- Silicate bicalcique (C₂S) : 2CaO, SiO₂.
- Aluminate tricalcique (C₃A) : 3CaO, Al₂O₃ et Ferroaluminatecalcique (C₄AF) : 4CaO, Al₂O₃, Fe₂O₃, sont des minéraux plus durs que les silicates.

Les étapes de fabrication de ciment en voie sèche sont présentées dans la (figure 10).

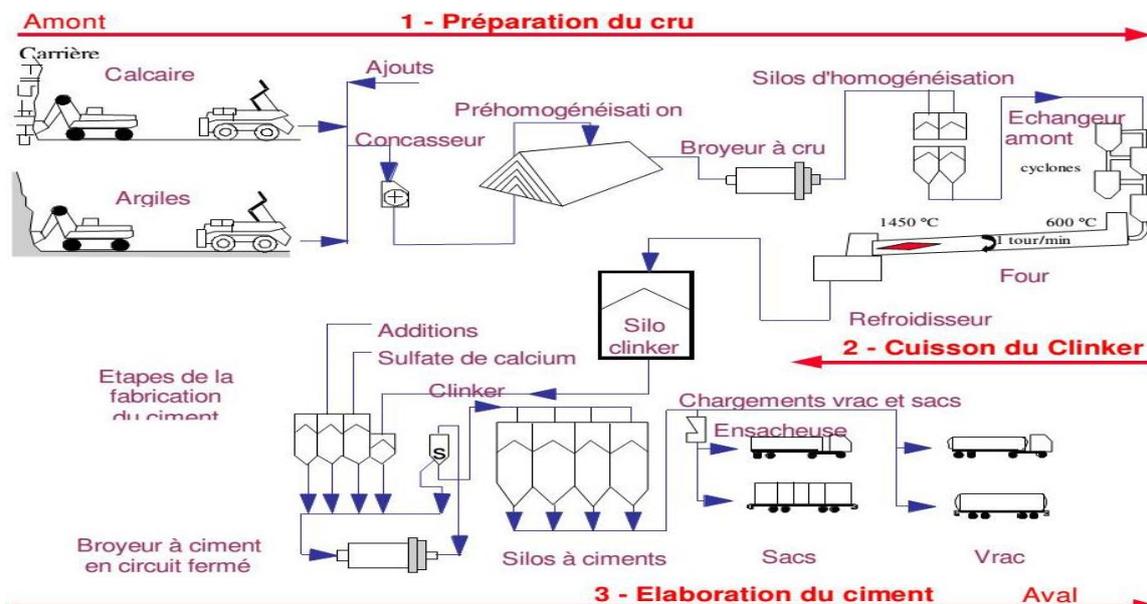


Figure 10 : Schéma de différentes étapes de la fabrication du ciment en voie sèche. [15]

8. Types des ajouts

Les ciments avec ajouts (ciments composés) sont obtenus par l'addition, lors de broyage du clinker, du gypse et d'éléments minéraux comme les laitiers de hauts fourneaux, les cendres de centrales thermiques, les fillers calcaires, les pouzzolanes naturelles ou artificielles. Ainsi sont obtenues les différentes catégories de ciments qui permettront la réalisation d'ouvrages allant du plus courant au plus exigeant [9].

a. Gypse (CaSO_4)

Le clinker « pur » très fin est caractérisé par de courts délais de prise (3 à 5 min), ce qui le rend pratiquement inutilisable. Ce fait est surtout dû à la célite (C3A) qui s'hydrate rapidement tandis que ses hydrates deviennent rapidement compacts et se cristallisent.

Il s'ensuit que pour ralentir la prise du ciment, il faut lier les hydro aluminates de calcium en d'autres composés. Ce rôle peut bien être joué par le gypse qui réagit énergiquement avec l'hydro aluminat tricalcique et produit un sel insoluble l'hydrosulfoaluminat de calcium ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot3\text{CaSO}_4\cdot31\text{H}_2\text{O}$). La quantité à introduire doit correspondre à la teneur en C3A dans le liant. Lorsque cette teneur en gypse est respectée, l'action des hydroaluminates de calcium se trouve paralysée au moment initial.

b. Ajout minéral actif

Ces ajouts qui jouent le rôle suivant : d'après leur composition ils se présentent principalement par de la silice amorphe qui réagit activement avec l'hydroxyde de chaux qui se forme lors de l'hydratation des minéraux faisant partie du clinker.

Le rapport entre le clinker et l'adjuvant hydraulique (ajout minéral) est établi en fonction de l'activité de l'adjuvant et de la composition minéralogique du clinker. Plus l'adjuvant est actif, plus il peut fixer l'oxyde de calcium hydraté et moins il faudra de ciment pouzzolanique [10].

c. Laitiers de haut-fourneau

On obtient du laitier granulé de haut fourneau par refroidissement rapide de la scorie fondue, c'est-à-dire des résidus provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau. Il est constitué, en masse, d'au moins deux tiers de CaO , MgO et SiO_2 , le reste contenant Al_2O_3 et de faibles quantités d'autres oxydes.

Les laitiers existent sous forme de poudre fine, sèche. Ils sont considérés comme un matériau hydraulique latent, qui présente des propriétés hydrauliques après avoir subi une activation convenable, en effet, l'ajout d'eau à un échantillon de laitier vitrifié n'entraîne aucun durcissement du mélange. L'hydratation des laitiers engendre la formation de CSH (silicate de calcium hydraté), d'aluminates (AC_2H_7) et de silicoaluminates (dérivés de l'ettringite) [11].

d. Cendres volantes

Si la proportion de cendres volantes dans le ciment excède 5 % en masse (constituant principal), seules les cendres volantes satisfaisant aux spécifications suivantes doivent être utilisées :

Les cendres volantes peuvent être de nature silico-alumineuse (Cendres volantes siliceuses (V)) ou silico-calcaire (Cendres volantes calciques (W)). Les premières ont des propriétés pouzzolanique ; les dernières peuvent avoir, en plus, des propriétés hydrauliques.

Les cendres volantes sont obtenues par dépoussiérage électrostatique ou mécanique de particules pulvérulentes provenant du courant de gaz des chaudières, alimentées au charbon pulvérisé. Les cendres obtenues par d'autres méthodes ne doivent pas être utilisées dans les ciments conformes à la norme Algérienne [11].

e. Fumées de silice

La fumée de silice est un coproduit industriel de la fabrication du silicium métallique ou de divers alliages de Ferro silicium.

Elle est produite lors de la réduction du quartz très pur par du charbon dans un four à arc électrique. Elle est recueillie par filtration des gaz qui s'échappent lors de la combustion.

La fumée de silice se présente généralement sous forme de particules sphériques de très petite taille dont le diamètre moyen est de l'ordre de 0,1 μm et composées de silice amorphe (>85%). Ces particules sont essentiellement vitreuses, ce qui en fait un produit hautement pouzzolanique. Elles permettent aussi de compléter la granulométrie des ciments et ainsi d'améliorer la compacité du matériau durci et donc sa résistance mécanique.

f. Pouzzolanes

Les pouzzolanes naturelles sont essentiellement des substances d'origine volcanique ou des roches sédimentaires ayant une composition chimique et minéralogique appropriées. Elles sont essentiellement composées de silice, d'alumine et de fer, et développent naturellement

des propriétés pouzzolanique. Les pouzzolanes artificielles correspondent à des produits essentiellement composés de silice, d'alumine et d'oxydes de fer qui, activés thermiquement, développent des propriétés pouzzolanique (argiles ou schistes par exemple).

Les pouzzolanes ne durcissent pas elles-mêmes en présence d'eau, mais elles réagissent à température ambiante en présence d'eau, avec l'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$ libéré au cours de l'hydratation du clinker, pour former des CSH et des aluminates de calcium hydratés [12].

9. Réactions chimiques

À partir de 650°C , le calcaire commence à former de la chaux et du gaz carbonique. Celle-ci réagit rapidement avec les matières siliceuses pour former des aluminates et des ferrites (qui restent en faible proportion). Une fois consommés, une grande partie devient de la bélite. Le système reste stable jusqu'à 1200°C , où du liquide se forme. La quantité de liquide dépend du rapport entre aluminates et ferrites. Celui-ci est très important puisqu'il permet la réaction entre la bélite et la chaux pour former de l'alite Figure 11.

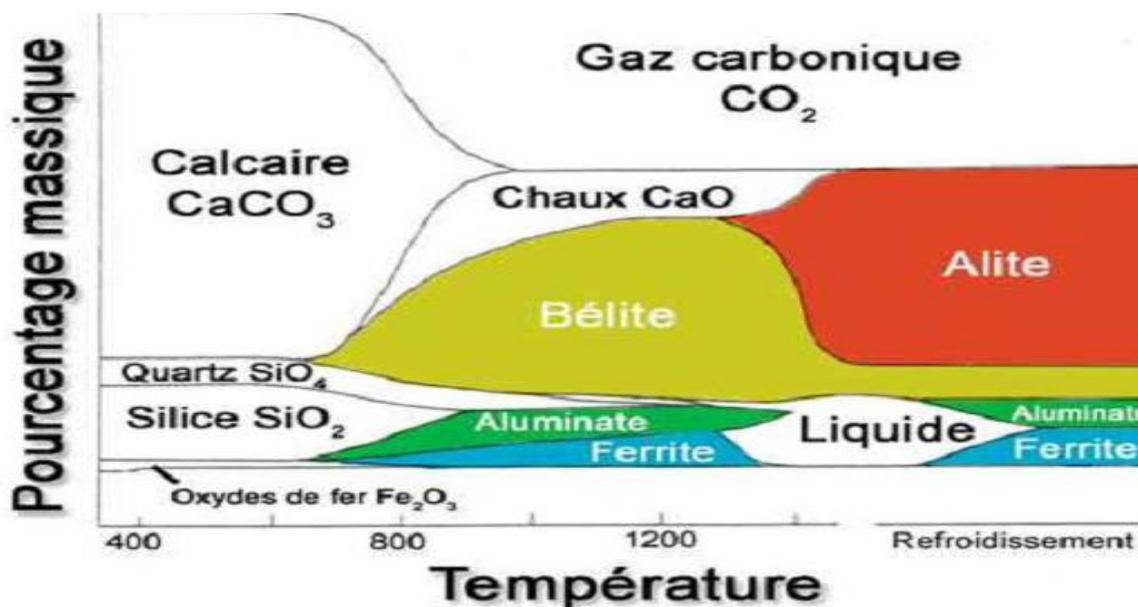


Figure 11 : Réactions chimiques lors de la clinkérisation. [13]

10. Types de ciment [7]

10.1. Ciments Portland :

- A. Ciment Portland (CEM I) : Il contient au moins 95 % de clinker et au plus 5 % de constituants secondaires.*
- B. Ciment Portland composé (CEM II/A ou B) : Il contient au moins 65 % de clinker et au plus 35 % d'autres constituants : laitier de haut fourneau, fumée de silice (limitée à 10 %), pouzzolane naturelle, cendres volantes, calcaires, constituants secondaires.*
- C. Ciment de haut fourneau (CEM III) : Il contient entre 36 et 95 % de laitier et 5 à 64 % de clinker.*
- D. Ciment au laitier et aux cendres (CEM V/A ou B) : Il contient de 20 à 64 % de clinker, de 18 à 50 % de cendres volantes et de 18 à 50 % de laitier.*

10.2. Autres ciments

- A. Ciment prompt naturel (CNP) NF P 15314 : Le ciment prompt naturel est un produit, à prise rapide, et à résistances élevées à très court terme.*
- B. Ciment alumineux fondu (CA) NF P 15315*
- C. Ciment à maçonner (CM) NF P 15307 : Ces ciments, dont les résistances sont volontairement limitées par rapport aux ciments classiques.*
- D. Ciment blanc : La teinte blanche est obtenue grâce à des matières premières très pures (calcaire et kaolin) débarrassées de toutes traces d'oxyde de fer. Les caractéristiques sont analogues à celles des ciments Portland gris (norme NF EN 1971).*

En plus de ces types de ciments on définit un autre type de ciment ce que on appelle le ciment pétrolier

10.3. Ciment pétrolier

Les ciments pétroliers, qui servent à étanchéifier les puits de pétrole, sont habituellement fabriqués à partir de clinker de ciment portland ou de ciments hydrauliques composés. En général, ils doivent prendre lentement et être résistants aux températures et aux pressions élevées. [16].

Les ciments pétroliers sont des ciments spéciaux utiliser pour la cimentation des puits pétroliers ou de gaz, son objectif essentiel réside dans la séparation des diverses zones productrices, ou fissures mises en communication au cours de forage.

Le ciment doit se soumettre à certaines conditions telle que :

- Température élevée en fonction de la profondeur.
- Pression élevée dans le puits.
- Eléments agressifs, sulfates, hydrocarbonates chlorures, etc...

11. Domaines d'utilisation

Le ciment pétrolier classe G est utilisé comme ciment de base pour cimenter les puits de pétrole et de gaz. Il est aussi utilisé dans les puits d'eau, les puits de dépôts de déchets et les puits géothermales. Il joue un rôle important dans le succès du forage d'un puits. Il est utilisé dans le but d'isoler les zones faibles de la paroi du puits au moment du forage.

Le ciment pétrolier se caractérise par les propriétés suivantes :

- Avoir une faible perméabilité.
- Avoir une bonne adhésion à la paroi.
- Maintenir ses propriétés sous la pression et la température du puits.
- Protéger l'ouvrage des vibrations causées par le forage continu.
- Protéger l'ouvrage des fluides agressifs.
- Protéger l'ouvrage contre l'effondrement.

On peut citer les caractéristiques physico-chimiques d'un ciment pétrolier classe G énoncé par API dans le tableau 3

Tableau 3 : Caractéristiques chimique d'un ciment pétrolier classe G.

Eléments	Ciment de classe		
	A	B	C
Type ordinaire(O)			
Magnésie (MgO)	5,00	-	5,00
Anhydre sulfurique (SO ₃)	3,50	-	4,50
Perte au feu	3,00	-	3,00
Résidu insoluble	0,75	-	0,75
C3A	-	-	15,00

Conclusion

Les recherches qui sont présentées lors de cette étude bibliographique, notamment sur le plan expérimental, nous montrent que le procédé de fabrication du ciment portland nécessite une énergie importante et dégagent du CO₂ et de la poussière causant la pollution de l'environnement, d'où le recours à l'utilisation des ajouts cimentaires comme remède à ces problèmes ce qui permet de :

- Diminuer la quantité de clinker utilisé d'où un gain d'énergie.
- Préserver l'environnement.
- Améliorer les propriétés du ciment

Introduction

Le but de ce chapitre est de présenter les résultats des travaux expérimentaux qui ont été réalisés dans le cadre de notre travail et de donner des interprétations à ces résultats et les justifier.

Cela nous a permis, grâce à des manipulations simples et rapides, de mettre en évidence la variation de la maniabilité du liant lors de la substitution progressive de cet ajout. L'obtention de ces mélanges nous a permis d'étudier une série d'essais physiques et mécaniques qui sont : la consistance normale, les temps des prises ainsi que les résistances mécaniques (compression et flexion).

1. Techniques analytiques utilisées

a. Analyses chimiques par FX : La fluorescence des rayons X (FX) est une méthode spectrale d'analyse qui exploite la fluorescence des atomes dans le domaine des rayons X, pour obtenir des renseignements qualitatifs et/ou quantitatifs sur la composition élémentaire de l'échantillon sur un appareil de type « Panalytical-Zetium » (voir la **figure 12**). L'excitation des atomes est provoquée soit par un faisceau de rayons X, soit par un bombardement avec des particules, généralement des électrons. L'échantillon émettra à son tour les raies caractéristiques de chacun des atomes de constituant. Le spectre de fluorescence obtenu, constitué de radiations dont les fréquences (ou longueurs d'ondes) ainsi que l'intensité caractérisent la composition qualitative ou quantitative de l'échantillon.

Une quantité de 12g de chaque échantillon à analyser doit être broyée et comprimée sous forme de pastilles, après avoir mélangée avec une petite quantité de 1g de cellulose pour permettre l'homogénéité des particules. En fin de préparation, les pastilles sont montées à l'intérieur de l'appareil d'analyse.



Figure 12 : Appareil d'analyse chimique par FX

b. Analyses par diffraction des rayons X (DRX)

Les analyses ont été réalisées à l'aide d'un diffractomètre type « X Pertpro-PANalytical », à (30mA x 40kV) travaillant sur la radiation monochromatique $K\alpha_1$ de cuivre ($\lambda=1.5406$), les paramètres choisis sont une faible vitesse de rotation ($0.1^\circ/\text{mn}$) avec un pas de 0.1° et un temps assez long pour obtenir des raies bien définies. Le domaine observé de l'angle 2θ est compris entre 3 et 80° . Les diffractogrammes obtenus sont comparés à ceux des bases de données du fichier ICDD (international center of diffraction data). Le principe de l'identification des matériaux sur DRX repose sur la loi de Bragg : lorsqu'un faisceau de rayons x monochromatique tombe sur un cristal, il donne naissance à un faisceau réfléchi, de même longueur d'onde que le rayonnement incident. La direction des rayons réfléchis est donnée par la loi de Bragg : $2d \sin(\theta) = n \lambda$

Avec :

- d : Distance inter réticulaire ente deux plans d'une même famille ;
- θ : Angle de diffraction ;
- n : Nombre entier appelé ordre de réflexion ;
- λ : Longueur d'onde d'incidence.

2. Matière première

a. Tuf volcanique : Avant de commencer l'opération nous avons prélevé une quantité de tuf que nous avons utilisée comme substituant des sables dans la confection des éprouvettes du béton. Le tuf brut et après séchage à l'air, est préparé par un concassage jusqu'à 2 mm de granulométrie à l'aide d'un concasseur type « FRITSCH »

Les compositions chimiques et minéralogiques sont présentées par le tableau 6 et le diffractogramme de la figure 14, respectivement.

b. Ciment : le ciment utilisé produit à la cimenterie de Ain kbira, est de type (CEM I 42.5 N NA442°). Dont les caractéristiques et la composition chimique sont présentées aux tableaux 5

c. Le sable : Le sable utilisé dans cette est étude expérimentale est normalisé, (SABBIA NORMALE STANDARD SAND) certifié CEN, EN 196-1 conforme ISO 679 :2017 (voir figure 13).

Un sable normalisé, est un sable naturel, siliceux notamment dans ses fractions les plus fines. Il est propre, les grains sont de forme généralement isométrique et arrondie. Il est séché, criblé

et préparé dans un atelier moderne offrant toutes garanties de qualité et de régularité dans le laboratoire d'essais des matériaux de la ville de Paris contrôlé par. (L.E.M.V.P). Le sable est conditionné en sachets de polyéthylène contenant chacun 1 350 g.

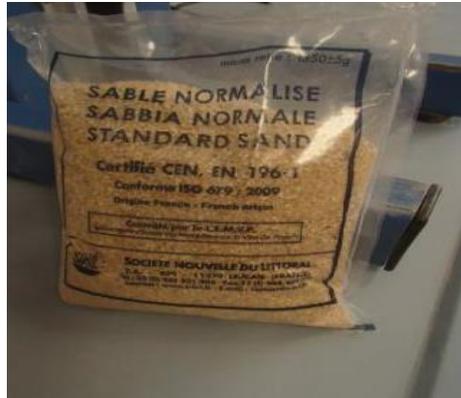


Figure 13 : Sable normalisé utilisé dans l'expérience.

c. **L'eau** : De l'eau distillée est utilisée comme eau de gâchage.

NB : Un rapport Eau/ciment de 0,5 et un rapport Ciment/Sable de 1/3 (en accord avec la norme EN196-1 2017.)

3. Caractéristiques des matières premières

L'analyse par fluorescence X donnée par le tableau 5, a permis de mettre en évidence les principaux éléments de tuf volcanique (SiO_2 , Al_2O_3 et Na_2O). Nous remarquons une teneur forte en K_2O qui est de 3,91 %, dont l'origine doit raisonnablement être attribuée à la fois à la sanidine et la mordenite (minéral). Une perte au feu de 5.26 % attribuée au départ de l'eau physisorbée et de l'eau structurale. Le rapport (SiO_2 / AlO_3) est de 3,80, proche de la limite inférieure de rapport donné par la littérature qui est entre 4,15 et 5,15. Dans le reste de ce travail, on va s'intéresser qu'aux deux fractions de ce tuf. Les tableaux 5 et 6 montrent la composition chimique du ciment et le tuf volcanique.

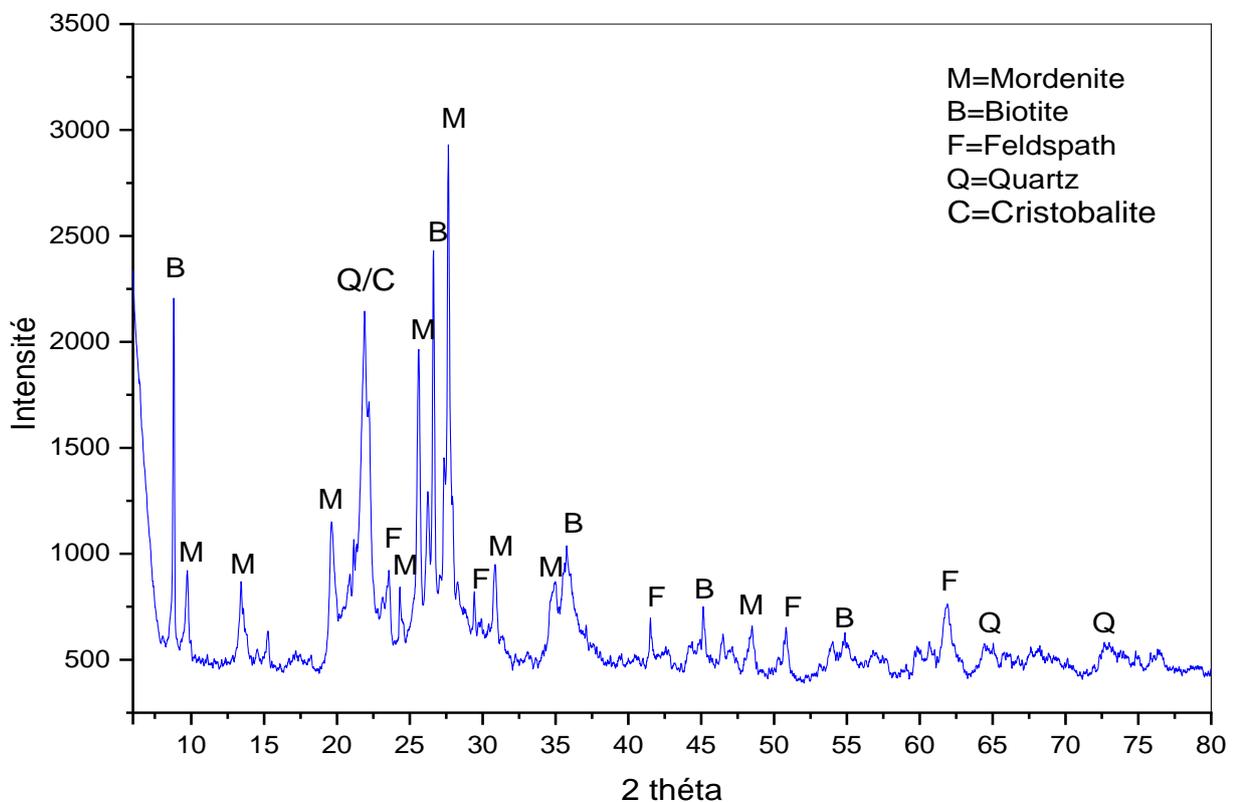
Tableau 4 : Composition chimique du ciment utilisé, obtenu par analyse par FX

Oxydes	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	Cl	PAF
Percentage	19.93	4.26	4.65	61.56	1.54	2.14	0.324	0.143	0.001	3.88

Tableau 5 : Composition chimique du tuf volcanique utilisé, obtenu par analyse par FX

Oxydes	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Cl	PAF
Percentage	68.59	15.44	1.70	1.47	0.22	0.01	3.91	3.39	0.005	5.26

L'étude minéralogique réalisée par la diffraction des rayons X, a pour but de détermination des différents constituants minéralogiques de notre tuf et de leurs proportions relatives.

**Figure 14** : Diffractogramme DRX de tuf volcanique

L'analyse par DRX mis en évidence la présence des pics caractérisant des minéraux aluminosilicatés, présenté par la mordenite (zéolite naturelle) ainsi que des feldspaths.

Les phases micacées sont représentées essentiellement par la biotite alors que la silice représentée principalement par la cristobalite et le quartz.

4. Préparation des éprouvettes

La préparation des éprouvettes et le reste des essais ont été effectués au sein de laboratoire de la cimenterie de Ain El kebira. La préparation doit suivre le mode opératoire suivant :

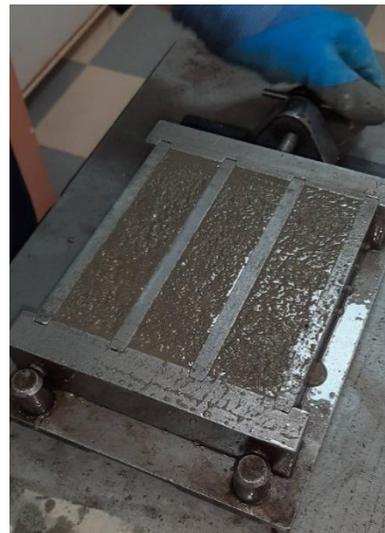
- Le moule et sa hausse fermement fixés à la table de choc.
- Remplir avec précaution à l'aide d'une cuillère convenable, le moule à moitié et dans chaque compartiment de celui-ci.
- Etaler la couche uniformément en utilisant une spatule adéquate ; la tenir verticalement et avec des mouvements de vas et viens.
- Démarrer ensuite l'appareil de choc pour 60 coups.
- Introduire la seconde couche, niveler avec la spatule et démarrer l'appareil pour 60 autres coups.
- Retirer avec précaution le moule de la table, puis enlever immédiatement l'excès de mortier avec une règle métallique plate.
- Lisser la surface des éprouvettes en tenant la règle presque à plat.
- Etiqueter les moules pour identification.
- Placer sans tarder, les moules dans une armoire humide, pendant 24 h.
- Après 24 heures de cure, faire sortir les moules et procéder au démoulage des éprouvettes.
- Immerger sans tarder, les éprouvettes dans un bain d'eau de température $20 \pm 1^\circ\text{C}$.

L'ensemble de l'essai est décrit de manière détaillée par la norme EN196-1. 2017. Il nécessite

- Armoire humide (chambre d'humidité) maintenue à une température de $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ et une humidité relative supérieure à 90%.
- Un malaxeur normalisé et une table à choc.
- Moules normalisés permettant de réaliser trois éprouvettes prismatiques de section carrée
- $4 \times 4 \text{ cm}^2$ et de longueur 16 cm.

Tableau 6 : Epreuve 4×4×16 de mortier préparé

Epreuves 4×4×16				
Constituants	% de substitution			
	0	10	15	20
Sable(g)	1350	1215	1147.5	1080
Ciment (g)	450	450	450	450
Eau (ml)	240	240	240	240
Tuf (g)	0	135	202.5	270

**Figure15** : Malaxeur automatique**Figure 16** : Epreuves préparées sur des moules 4×4×16

5. Essai de temps de prise

Consiste à suivre l'évolution de la consistance d'une pâte de consistance normalisé est "VICAT « équipé d'une aiguille de 1.13mm diamètre. Quand sous l'effet d'une charge 300g l'aiguille s'arrête à une distance (d) du fond de moule telle que $d=4\text{mm}$ plus ou moins 1mm on dit que le début de pris est atteint à ce moment, mesuré à partir de début de malaxage, est

appelé "tempes de début de prise " le "temps de fine de prise "est celui au bout duquel l'aiguille ne s'enfonce plus que de 0.5mm.



Figure 17 : Moule tronique



Figure 18 : Prisomètre

Pour mesurer le temps de prise il faut suivre les étapes suivantes :

- Placer le moule dans l'appareil de Vicat automatique pour connaître le début et la fin de prise du ciment.
- Le temps de début de prise correspond à la lecture de 4 ± 1 millimètres du fond du moule, noté à partir du temps 0.
- Le temps de fin de prise correspond à la lecture de 0,5 millimètres de la surface du moule, noté à partir du temps zéro.

Ci-dessous des tableaux qui montrent la variation de la hauteur en fonction du temps de prise à 0%, 10%,15% et 20% de tuf.

A (0 %) de tuf : Témoin**Tableau 7** : Variation de la hauteur en fonction du temps pour 0% témoin

Temps (min)	115.56	176.27	252.43	854.43	864.06
Hauteur (mm)	40	3.9	1.3	1.3	0.4

A (10%) : **Tableau 8** : Variation de la hauteur en fonction du temps pour 10% de tuf

Temps(min)	100.22	272.42	353.42	383.59	399.07
Hauteur(mm)	39.9	10.3	3.1	0.7	0.1

A (15%) : **Tableau 09** : Variation de la hauteur en fonction du temps pour 15% de tuf

Temps (min)	100.16	221.45	312.53	397.51	407.57
Hauteur(mm)	40.0	28.4	9.4	0.1	0.3

A (20%) : **Tableau 10** : Variation de la hauteur en fonction du temps pour 20% de tuf

Temps (min)	100.03	281.7	377.38	397.51	407.57
Hauteur(mm)	40.0	13.3	1.7	0.4	0.0

Tableau 11 : Résultats récapitulatifs de début et fin de prise.

Pourcentage %	Temps de début de pris	Tempe de fine de pris
0%	204.23	369.30
10%	207.04	384.30
15%	207.48	400.54
20%	205.21	393.57

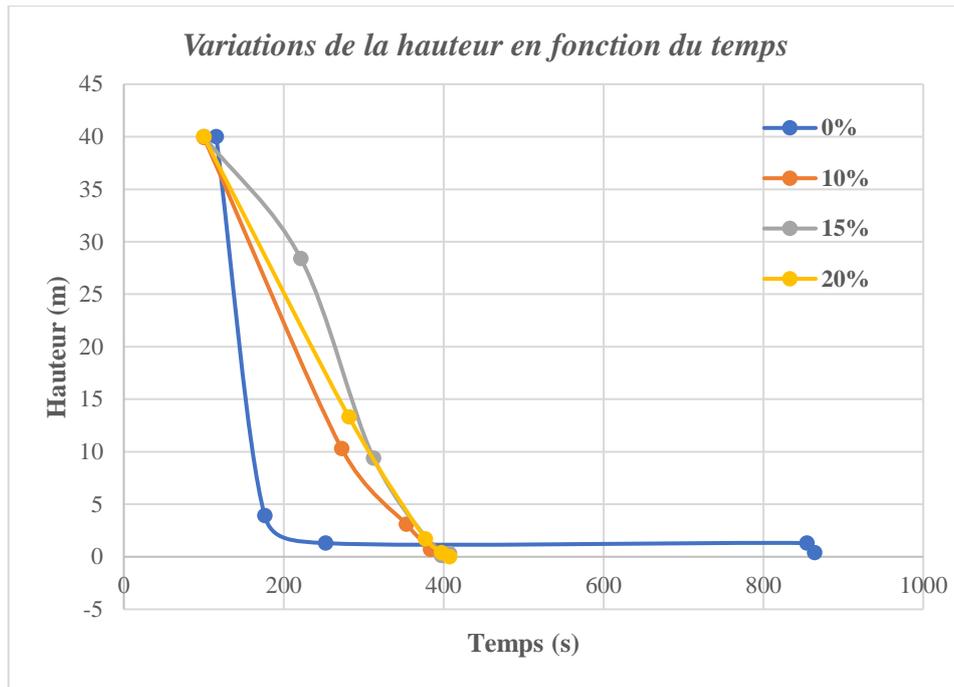


Figure 19 : Variations de la hauteur de l'aiguat en fonction du temps de prise

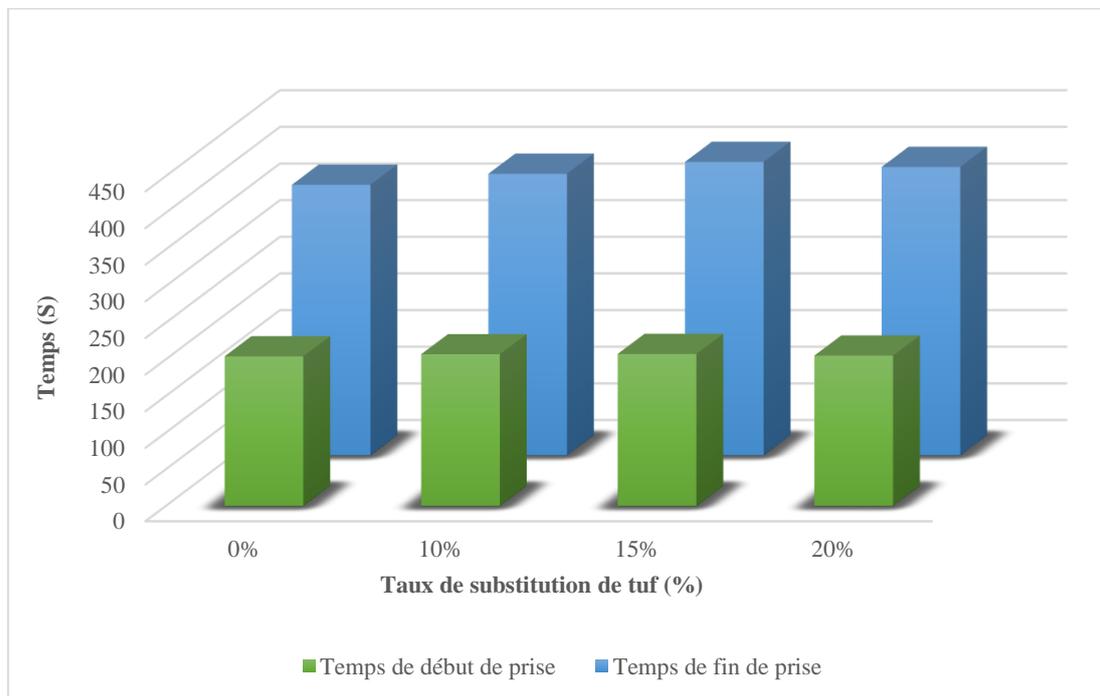


Figure 20 : Histogramme du temps de début fin de pris

Le tableau 11 et la figure 20, récapitulent les résultats des essais du temps de prise (début et fin de prise).

D'après les figures (19 et 20), on remarque que la hauteur de tous les échantillons diminue rapidement avec le temps, au début, la hauteur est 40mm et en fonction de temps, il diminue jusqu'à la valeur zéro, c'est à dire la consistance et le durcissement de l'échantillons augmente avec le temps de prise.

Il est constaté donc que l'échantillon témoin durcit rapidement, plus que les autres échantillons auxquels il est incorporé le tuf volcanique.

Cependant, nous remarquons que la courbe de l'échantillon à 10% de tuf, présente un temps de prise moins réduit que le reste des échantillons à l'exception de l'échantillon témoin. Soit un temps de 4heures et 54 minutes, qui correspond à une hauteur de pénétration de 10,3mm.

De ce fait, on conclut que ; la présence de tuf zéolithique dans le béton augmente le temps de durcissement du mortier préparé, cela est expliqué par le caractère adsorbon (d'eau) des zéolithes présentes dans le tuf, qui ralentisse le durcissement du mortier.

6. Essais mécaniques

Les résistances mécaniques des ciments sont déterminées par des essais sur mortier dit 'normale' à 28 jours d'âges en flexion et compression des éprouvettes 4 x 4 x 16 cm³ (figure 21).

La résistance du mortier est alors considérée comme significative de la résistance du ciment. Elle dépend de la classe du ciment et est exprimée en Méga Pascal (MPa).

Le mortier utilisé est réalisé conformément à la norme EN196-1. Le sable utilisé est un sable normalisé CEN' selon la norme EN196-1'. (2017).

Pour cet essai, on doit préparer 04 types de mortiers, (le premier pour le ciment témoin sans ajout.) les autres pour le ciment renfermant 10,15, et 20(%) de tuf volcanique, chaque échantillon est mélangé avec 240ml d'eau distillée et 1350g du sable normalisé, et 450g ciment.

En utilisant une presse mécanique, qui précise l'écartement des cubes et mesure la résistance à la compression des échantillons (figure 22).

6.1. Résistance à la flexion (Rf)

Les résultats des essais mécaniques, après 2,7,28 jours, sur les éprouvettes préparées sont montrés au tableau 12 et traduits en courbes présentées par les figures 23 et 24.



Figure 21 : éprouvettes durcies à différents âges.



Figure 22 : Presse pour essais mécaniques

Tableau 12 : Résultats des mesures de la résistance à la flexion

Type de ciment	Résistance à la flexion (MPa)		
	2 jours	7 jours	28 jours
0%	03.52	5.81	7.39
10 %	03.04	5.06	6.41
15 %	02.81	4.51	5.48
20 %	2.08	4.02	5.43

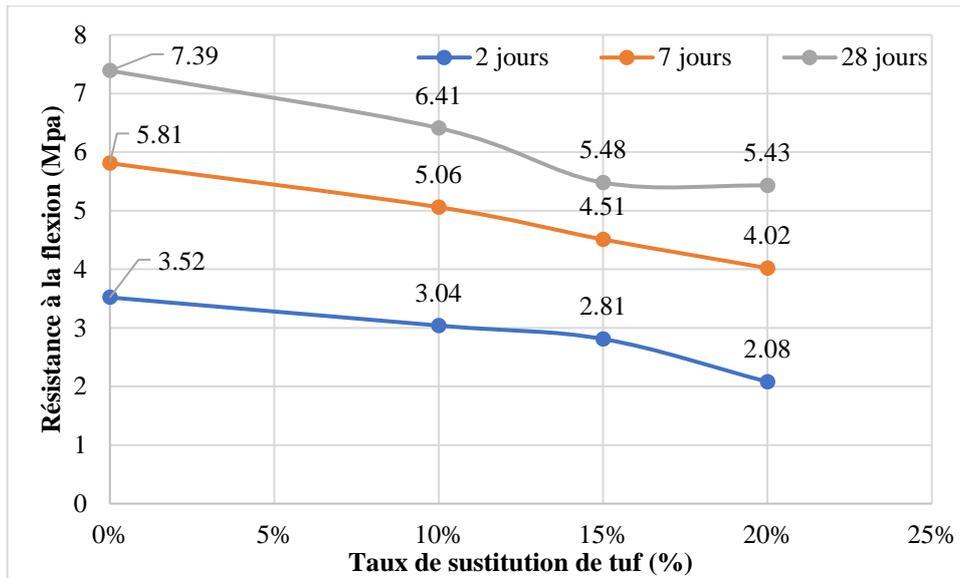


Figure 23 : Variation de la résistance à flexion en fonction du % de tuf.

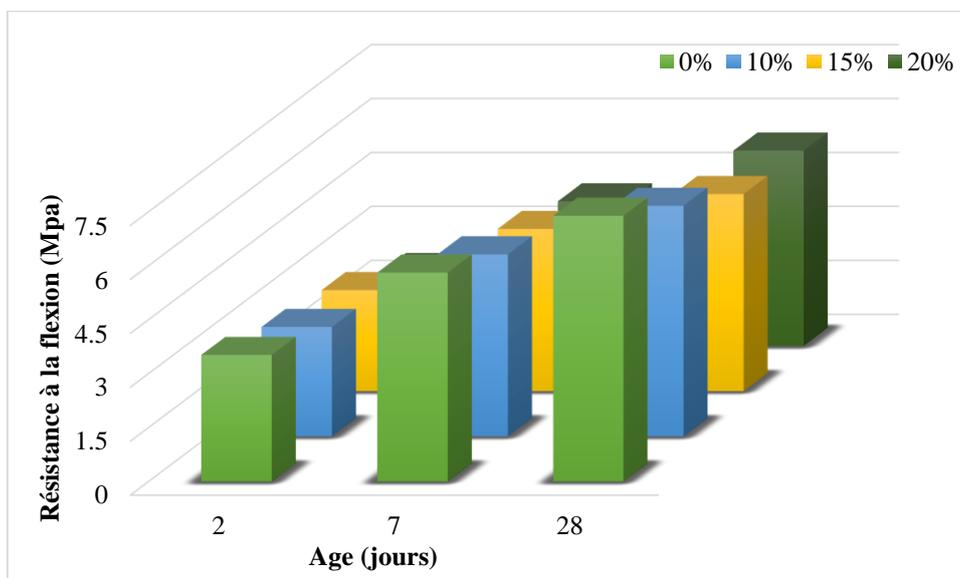


Figure 24 : Variation de la résistance à la flexion en fonction des taux de tuf volcanique.

Suivant les courbes de la figure 23, on remarque que les mortiers contenant du tuf volcanique développent des résistances qui restent toujours inférieures à celles du mortier témoin et cela à tous les âges. Les meilleures résistances sont enregistrées pour l'âge de 28 jours, notamment pour l'échantillon témoin et à un degré moins, l'échantillon à 10% de tuf ($R_c=6,51\text{Mpa}$ à l'âge de 28 jours). La présence de tuf dans le béton a réduit considérablement sa résistance à la flexion. Plus que la proportion de tuf dans le béton augmente, plus que la résistance

déminue, ce résultat est attendu vu que le tuf est riche en zéolithes (mordénite) qui est connue par sa structure poreuse.

6.2. Résistance à la compression (R_c)

C'est un essai couramment utilisé sur les bétons ou les mortiers à l'état durci. La précision des résultats de l'essai de la résistance à la compression est affectée par plusieurs paramètres : le type des matériaux et leurs dimensions, la préparation des faces d'essai ...etc.

Le but de cet essai est de suivre l'évolution de la résistance, pour chaque éprouvette, pour les âges de 2 jours, 7 jours, 28 jours, après avoir retiré ces éprouvettes immergées dans la solution sulfatique.

Principe de l'essai consiste à soumettre les éprouvettes étudiées à une charge croissante jusqu'à la rupture. La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section de l'éprouvette.

La résistance à la compression a pour expression :

$$R_c = F/S$$

Avec :

F : charge de rupture exprimée en MN.

S : surface de l'éprouvette exprimée en m^2

Les résultats expérimentaux sont présentés au tableau (13) et les figures (25 et 26) qui montrent l'effet de tuf dans le béton sur sa résistance à la compression.

Tableau 13 : Résultats des mesures de la résistance à la compression

Taux de substitution de tuf (%)	Résistance à la compression (Mpa)		
	2 jours	7jours	28jours
0%	15.36	29.05	45.45
10 %	13.775	40.2	48.6
15 %	10.545	21	33.15
20 %	08.205	29.05	35.1

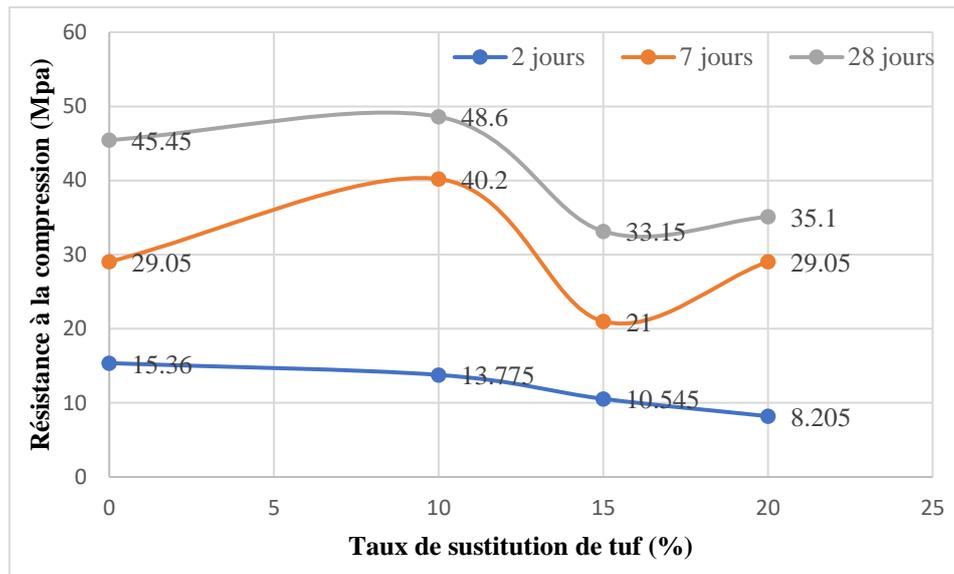


Figure 25 : Variation de la résistance à compression en fonction du % de tuf.

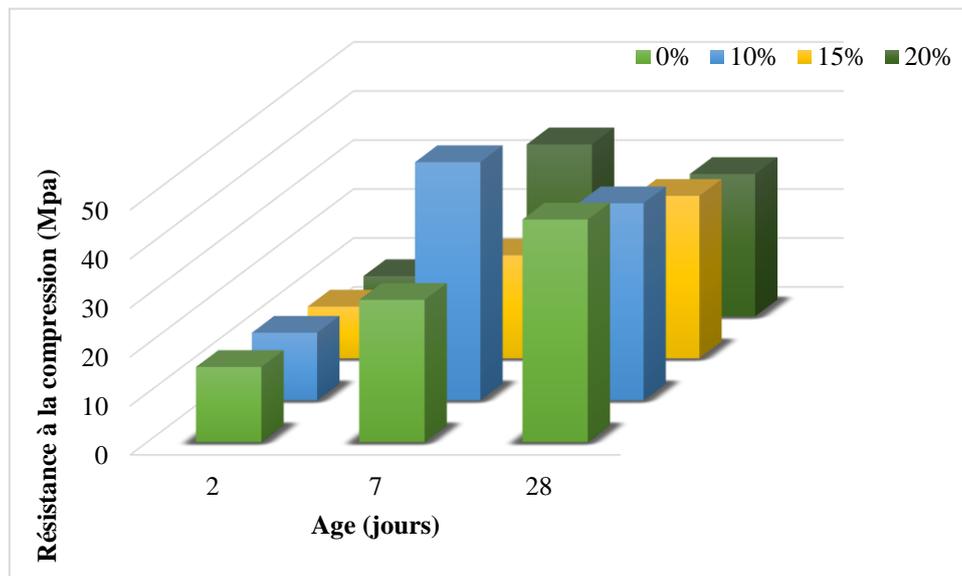


Figure 26 : Variation de la résistance mécanique à la compression en fonction du taux de tuf volcanique.

D'après la figure 25, qui présente l'effet d'ajout du tuf volcanique sur la résistance à la compression des mortiers aux différents âges : 2, 7 et 28 jours, on remarque d'une manière

générale que ; des réductions systématiques des résistances des mortiers au fur et à mesure que la hausse du pourcentage du tuf volcanique, à l'exception de à l'âge 7 jours, on constate une augmentation importante de la résistance à la compression (40.2 et 35,1MPa) des échantillons à 10% et 20% de tuf, respectivement.

De ce fait, l'ajout de tuf à 10% dans le béton peut être considéré avantageux pour améliorer sa résistance à la compression aux jeunes âges (à partir de 7 jours).

Conclusion

D'après le travail effectué on peut tirer les conclusions suivantes :

-Le durcissement des mortiers préparés à base de tuf, ont un temps de prise très long, due au caractère adsorbons de tuf riche en zéolithe. Cependant l'échantillon à 10% de tuf volcanique montre un temps de prise proche à l'échantillon témoin.

-Chaque fois que nous augmentons la quantité de tuf volcanique à certain pourcentage, la rigidité diminue par rapport à l'échantillon de témoin. Le tuf traité a une grande capacité d'absorption.

-La résistance à la flexion se montre très faible pour les différents échantillons à différents âges, cela par rapport à l'échantillon témoins.

-L'ajoute de tuf volcanique à 10 % dans la fabrication des mortiers, montre une résistance à la compression très importante au jeunes âges (7 jours) comparativement aux autres échantillons.

-Le tuf volcanique est adsorbon de l'eau du mélange dans les mortiers préparés, ce qui les rendre plus fragiles aux contraintes mécaniques.

En fonction des résultats obtenus, on constate que la résistance à la compression des échantillons est supérieure à celle de la flexion.

Le tuf zéolithique constitue aujourd'hui une substance très demandée de nombreux secteurs industriels, agricoles ou environnementaux, en raison de son importance, dans diverses applications à l'état brut ou modifié.

Les ciments et ses différents produits sont parmi les principaux consommateurs de tuf zéolithique par son application comme un produit pouzolanique pour le ciment, ou améliorateur de la qualité physicomécanique des bétons et dérivés.

Ce présent travail, a été l'objectif de valorisation de tuf zéolithique dans le béton est principaux résultats et conclusions sont résumés en ces points cités ci-dessous :

Une caractérisation méthodologique et chimique des matières premières utilisées a été réalisée (tuf volcanique zéolithique et ciment), dont les résultats ont montrés leur correspondance à la confection du béton.

La confection du béton à base du tuf zéolithique a montré que le durcissement des mortiers préparés à base de tuf, ont un temps de prise très long, due au caractère adsorbon de tuf riche en zéolithe. Cependant l'échantillon à 10% de tuf volcanique montre un temps de prise proche à l'échantillon témoin.

Les caractéristiques mécaniques du béton élaboré à base du tuf zéolithique, ne sont pas assez suffisantes, ou la résistance à la flexion se montre très faible pour les différents échantillons à différents âges, cela par rapport à l'échantillon témoins, néanmoins l'ajoute de tuf volcanique à 10 % dans la fabrication des mortiers, montre une résistance à la compression très importante au jeunes âges (7 jours) comparativement aux autres échantillons.

Vu que le tuf volcanique est un adsorbon de l'eau du mélange dans les mortiers, les résistances mécaniques (notamment à flexion) du béton apparaît moins consistant et fragiles aux contraintes mécaniques.

Ces essais de confection du béton à base de tuf, nécessite l'optimisation de plusieurs paramètres et l'étude de d'autres propriétés physiques et mécanique (densité, composition et résistance chimique, durabilité, etc.) pour une évaluation de la valorisation de tuf dans les bétons.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre 1 : Généralités sur les tuf zéolitiques

- [1] **Matériaux** de construction en pierres naturelles. Sétif (2011)
- [2] **BRGM Avergune** La pouzzolane. philipo Rocher géologie.
- [3] **P. JOYE.** Géologie appliqué au gène civil. (2005)
- [4] **BELKACEMI et KACEL.** Caractérisation et élaboration d'un schéma de traitement de tuf de Remila. (2014)
- [5] **Schumann Walter.** Guide des pierres et minéraux. (2007)
- [6] **Construction** déformant pour limiter les dégâts lors de séismes et éruption volcanique (université de Strasbourg).
- [7] <https://www.chabasai.com>
- [8] **Panaceo.** Résumé d'études scientifiques sur le mode d'action de la zéolite.
- [9] **B. ALLOUL.** Étude géologique et géotechnique des tufs calcaires et gypseux d'Algérie en vue de leur valorisation routière, Thèse de 3e cycle, Université Pierre-et-Marie- Curie,Paris-VI , (1972)
- [10] Ginter D.M., Bell A.T., Radke C.J., The effects of gel aging on the synthesis of NaY zeolite from colloidal silica, *Zeolites*, 12 (1992), 742-749.
- [11] Bronic J., Subotic B., Smit I., Despotovic L.A., Influence of gel aging on zeolite nucleation processes, *Studies in Surface Science and Catalysis*, 37 (1988), 107-114.
- [12] Lechert H., New routes in zeolite synthesis, *Studies in Surface Science and Catalysis*, 18 (1984), 107-123
- [13] Benaliouche F., Boucheffa Y., Magnoux P., Evidence of molecular encumbrance during iso-alkanes adsorption on 5A zeolite, *J. Soc. Alger. Chim*, 13 (2003) 207-214.
- [14] Ruthven D.M., Reyes S.C., Adsorption separation of light olefins from paraffins, *Microporous and Mesoporous Materials*, 104 (2007) 59–66.

- [15] Saved by 'sand' poured into the wonds- health- New Scientist (<http://www.newscientist.com/article.ns?id=mg18925435.800>), 16 March 2006.
- [16] Huik S., Chao C.Y.H., Pure, single phase, high crystalline, chamfered-edge zeolite 4A synthesized from coal fly ash for use as a builder in detergents, *Journal of Hazardous Materials*, 137 (2006) 401-409.
- [17] Milton R.M., US Patent, 2882243 et 2882244, 1953.
- [18] Poon C.S., Lam L., Kou S.C., Lin Z.S., A study on the hydration rate of natural zeolite blended cement pastes, *Construction Building Materials*, 13 (8) (1999), 427–32.
- [19] Dokuzuncu K., Plan Tasve T., Dayal S., Ozel I., Komisyonu R., *Cimento Sanayi*, D.P.T report, 2006.
- [20] Mumpton F.A., editor *Mineralogy and geology of natural zeolites*, New York: Reprint of Mineralogical Society of America's *Reviews in Mineralogy*, 1993.
- [21] Tsitsishvili G.V., *Natural Zeolites*, E. Horwood, New York, 1992.
- [22] Breck D.W., *Zeolite molecular sieves: structure, New York: Wiley Chemistry and Uses*, 1971.
- [23] Ortega E.A., Cheeseman C., Knight J., Loizidou M., Properties of alkali-activated Clinoptilolite, *Cement and Concrete Research*, 30 (10) (2000), 1641-6.
- [24] Caputo D., Liguori B., Colella C., Some advances in understanding the pozzolanic activity of zeolites: the effect of zeolite structure, *Cement and Concrete Composites*, 30 (5) (2008), 455–62.
- [25] Yilmaz B., Ucar A., Oteyaka B., Uz V., Properties of zeolitic tuff (clinoptilolite) blended Portland cement, *Building Environment*, 42 (11) (2007), 3808–3815.
- [26] Feng N., Yang H., Zu L., The strength effect of mineral admixture on cement Concrete, *Cement and Concrete Research*, 18 (3) (1988), 464–72.

[27] Drzaj B., Hocevar S., Slokan M., Kinetic and mechanism of reaction in the zeolitic tuff–CaO–H₂O systems at increased temperatures, Cement and Concrete Research, 8 (1978), 711-720.

[28] Massazza F., Pozzolana and pozzolanic cements, in: P.C. Hewlett (Ed.), Lea's Chemistry of Cement and Concrete, 4th Edition, Elsevier Ltd., London, 1998.

Chapitre2: Processus de fabrication des ciments a ain elkbira

[1] : [Taylor, 1997] .Cementchemistry.Telford,NewYork.

[2] M. ADAM, « Guide pratique pour l'emploi des ciments », édition Eyrolles 1985.

[3] S.ZEBIRI, rapport technique de la société des ciments d'Ain El Kebira, filiale du groupe E.R.C.E, « étude environnemental », 2000.

[4] groupe GICA, rapport technique de l'entreprise, « Présentation de la S.C.Ain El Kébira », AFAQ, OHSAS 18001 30 avril 2013.

[5] K.ZOUGHEM et W.CHENAFI, P.F.E « étude géotechnique de la stabilité des talus dans la carrière de Ain El Kebira (Sétif) », Université Ferhat Abbas-Sétif, 2006.

[6] KLOKNER, « résultats des recherches géologiques réalisées sur Djebel Medjounes », 1975.

[7] C.GHISLAIN, A.JOSEPH, Docteur ingénieur de l'École des mines de Paris et ingénieur de l'École nationale des ponts et chaussées, Directeur délégué Routes, Cimbéton, Paris, Techniques DE l'Ingénieur l'expertise technique et scientifique de référence Ciments.

[8] K.BELLARBI, rapport technique de l'entreprise, société des ciments Ain El Kebira.

[9] KLOKNER, « résultats des recherches géologiques réalisées sur Djebel Medjounes »,1975.

[10] F.GHOMARI, fiche technique en science des matériaux de construction,

université aboubekrbelkaid, faculté des sciences de l'ingénieur, département de génie civil.

[11] groupe GICA, rapport technique de l'entreprise, « Présentation de la S.C.Ain El Kébira », AFAQ, OHSAS 18001 30 avril 2013.

[12] K.MOUSSACEB, « Optimisation du système de gestion de l'homogénéisation du cru et du processus technologique de fabrication de ciment, Application le système carrière usine de fabrication, Application aux cimenteries Algériennes », thèse doctorat en génie des procédés, Université de Bejaia 2007.

[13] L. PLINSKIN, « la fabrication du ciment », 216, Paris, Eyrolles, 1993

[14] Y. BERTON and P. LE BERRE, guide de prospection des matériaux de carrières, collection annuels et méthodes N°5, édition BRGM et OPU, p.87-94, Alger, 1990.

[15] fiches techniques, CIM béton, « construire avec les produits préfabriqués en béton » école française du béton, CERIB, Fédération de l'industrie du béton.

[16] LAFARGE, S.A, «API well cement class "G" type HSR», cement produced according to standard, API SPEC 10 A, Oficinas Centrales: C/ Orense, 70 - 28020 Madrid 1997.

[17] : H. Rumpf, Aufber. Techn., 1973. 2: p. 59-71.

[18] : A. A. Griffith, The Phenomena of Rupture and Flow in Solids. Phil. Trans. Roy. Soc, 1921. 163-198.

ANNEXE N°01

Historique de la cimenterie Ain El Kebira

(NOTION GENERALES SUR SCAEK)

1974: Signature du contrat et début des travaux de réalisation de la cimenterie.

1978: Entrée en production en début novembre.

1982: Restructuration de l'ancienne SNMC et création de l'Entreprise Régionale des Ciments de l'Est (ERCE).

1991 : Installation d'une pré calcination (installation de bruleurs, modification de la boîte à fumée et des cyclones I).

1998: Filialisation de la Société des Ciments d' Ain El Kebira qui fabrique et vend du ciment sous le nom commercial (SCAEK).

2000: Dépassement pour la première fois de son histoire du seuil de 1 000 000 de tonnes de ciment par an.

2002: Certification du système qualité de la SCAEK à la norme ISO 9001 version 2000.

2005 : renouvellement de la tuyère du four, renouvellement des filtres de process.

2006 : Réalisation durant le mois de Mai, d'un filtre à manches pour le traitement des gaz chauds du four. Une technologie introduite pour la première fois en Algérie par la SCAEK.

2008:

- Réalisation d'un filtre à manche pour dépoussiérer l'atelier broyage ciment.
- Certification en Juin de la SCAEK à la norme ISO 14001 version 2004
- Remise par son excellence monsieur le ministre de l'environnement et de l'aménagement du territoire du deuxième prix national de l'environnement.

2009: Réalisation d'un filtre à manches pour le traitement des gaz refroidisseur (atelier cuisson).

2010:

- Mise en service d'un refroidisseur clinker de marque IKN.
- Affiliation au nouveau Groupe industriel des ciments d'Algérie (GICA).

2011:

- Certification de la SCAEK en SMI (Système de Management Intégré : Iso 14001 version 2004, Iso 9001 version 2008 et OHSAS 18001 version 2007).

- Dépassement pour la première fois de son histoire des seuils : de 1 000 000 de tonnes de clinker par an et 1 200 000 tonnes de ciment par an.

2012: Production annuelle record de ciment : 1 266 000 de tonnes de ciment.

29/08/2013 : Lancement des travaux de la 2ème ligne de la cimenterie Ain El Kebira (Sétif).

05/01/2017 : le Ministre de l'Industrie et des Mines, a inauguré la 2^e ligne de production de la cimenterie d'Aïn El Kebira (SCAEK).

30/04/2017 : le Premier Ministre a inauguré la 2e ligne de production de la cimenterie d'Aïn El Kebira (SCAEK) avec une capacité de production 1 tonne.

You can win,

if

you

Want!

Résumé

Le tuf volcanique est une roche riche en éléments essentiels tel que les zéolithes, son utilisation peut être avantageux pour améliorer ses qualités physicomécaniques. Donc l'objectif de cette étude est de tester les possibilités de prouver la valorisation de tuf volcanique dans le béton.

Au préalable, nous avons procédé à une étude d'identification et de caractérisation minéralogique et chimique (par diffraction par rayon X et fluorescence X) des matières premières.

Les principaux essais expérimentaux dans ce travail consistent à la détermination du temps de prise des mortiers de béton et la mesure des résistances mécaniques (flexion et compression) des éprouvettes en béton durci à différent âges.

Les résultats obtenus ne sont pas très satisfaisants pour la plupart des échantillons préparés à 0%, 10%, 15% et 20% de tuf volcanique riche en zéolithe. Hormis, les échantillons à 10% de tuf présente une meilleure prise du temps (pour mortiers cru) et de résistance (éprouvettes durcis).

Mots clés : Tuf volcanique, temps de prise, mortiers, résistance à la compression, résistance à la flexion.