



Université de Ghardaïa

N° d'ordre :
N° de série :

Faculté des Sciences et Technologies
Département D'hydraulique et de Génie Civil

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Domaine : *Sciences et Technologies*

Filière : *Génie Civil*

Spécialité : *Structures*

Par : OULED NAIMI Abdelmajid

RIGHI AMINA

Thème

Effet des argiles calcinées sur les propriétés physico
mécaniques des pâtes de ciment

Membres de jury :

Mr LAROU Abdelbasset

MAA

Université de Ghardaïa **Examineur**

Mr SAITI ISSAM

MAA

Université de Ghardaïa **Examineur**

Mr AZIEZ Mohammed Nadjib

MAB

Université de Ghardaïa **Encadrant**

Année universitaire 2020/2021

REMERCIEMENT

*Au terme de ce travail, nous tenons à remercier en premier lieu DIEU miséricordieux qui nous a donné la force et la patience pour achever ce travail. Nous voudrions saisir cette occasion pour remercier chaleureusement notre superviseur **Mr AZIEZ M, N** enseignant à l'Université de Ghardaïa, pour son dévouement, ses conseils et ses critiques tout au long de l'élaboration de ce mémoire.*

*Nos grands remerciements à Mr AMIEUR HADJ NACEUR et Mr BOUZID BACHIR et vont à l'ensemble du personnel du laboratoire des travaux publics du sud Ghardaïa (**LTPS SUD**) pour leur aide et leur disponibilité.*

À nos fidèles et sincères collègues qui nous ont accompagnés tout au long des études universitaires.

Nous remercions également les membres de jury qui ont accepté d'examiner notre travail.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail

DÉDICACES

A mon père et ma mère.

A toute ma famille.

A mes amis.

Aux vrais savants, modestes au Dieu

RESUME

Le béton est le matériau de construction ayant le plus grand potentiel pour répondre à la demande croissante de logements dans les pays en développement. Les matériaux disponibles localement doivent être considérés comme un remplacement du ciment afin de réduire les coûts et l'impact environnemental associés à la production de ciment. Par conséquent, cette étude a examiné l'utilisation potentielle de la bentonite calcinée comme addition minérale réactif dans le béton.

Les argiles de la bentonite ont été calcinées à des températures allant de 750 °C. L'étude de l'activité pouzzolanique a été réalisée dans des pâtes de ciment en remplaçant 0, 5, 10, 15, 20, 50 % de ciment par des bentonites calcinées à un rapport eau/liant de 0,5. Les résultats de la résistance à la compression des pâtes incorporant de 20% de bentonite calcinée étaient systématiquement similaires à celle du mortier 100 % OPC à partir d'environ 30 jours.

Ces études indiquent que Les bentonites calcinées disponibles localement ont un potentiel important pour remplacer le ciment dans le béton.

Mots clés :

Argiles calcinées, Pouzzolanes, bentonite, Activation thermique.

ABSTRACT

Concrete is the building material with the greatest potential to meet the growing demand for housing in developing countries. Locally available materials should be considered as a replacement for cement in order to reduce the costs and environmental impact associated with cement production. Therefore, this study examined the potential use of calcined bentonite as a reactive mineral addition in concrete.

The bentonite clays were calcined at temperatures ranging from 750 ° C. The study of pozzolanic activity was carried out in cement pastes by replacing 0, 5, 10, 15, 20, 50% of cement with bentonites calcined at a water / binder ratio of 0.5. The compressive strength results of pastes incorporating 20% calcined bentonite were consistently similar to that of 100% OPC mortar from about 30 days.

These studies indicate that locally available calcined bentonites have significant potential to replace cement in concrete.

Keywords

Calcined clays, Pozzolans, bentonite, Thermal activation.

ملخص

الخرسانة هي مادة البناء ذات الإمكانيات الأكبر لتلبية الطلب المتزايد على الإسكان في البلدان النامية. يجب اعتبار المواد المتاحة محلياً كبديل للأسمنت من أجل تقليل التكاليف والأثر البيئي المرتبط بإنتاج الأسمنت. لذلك ، فحصت هذه الدراسة الاستخدام المحتمل للبتوناييت المكلس كإضافة معدنية تفاعلية في الخرسانة.

تم تكليس طين البتوناييت عند درجات حرارة تتراوح من 750 درجة مئوية. أجريت دراسة نشاط البوزولاني في معاجين الأسمنت باستبدال 0 ، 5 ، 10 ، 15 ، 20 ، 50٪ من الأسمنت بالبتوناييت المكلس بنسبة ماء / مادة رابطة مقدارها 0.5. كانت نتائج مقاومة الانضغاط للمعاجين التي تحتوي على 20 ٪ من البتوناييت المكلس مماثلة بشكل ثابت لتلك الخاصة بملاط OPC 100 ٪ من حوالي 30 يوماً.

تشير هذه الدراسات إلى أن البتوناييت المكلس متاح محلياً لديه إمكانية كبيرة لتحل محل الأسمنت في الخرسانة.

كلمات مفتاحية :

الطين المكلس ، البوزولان ، البتوناييت ، التنشيط الحراري.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS.	I
DEDICACES	II
RESUME	III
ملخص	IV
ABSTRACT	V
TABLE DES MATIERES	VI
LISTE DES FIGURES	VIII
LISTE DES TABLEAUX	X
INTRODUCTION GENERALE	1
CONTEXTE	4
REFERENCES	5
CHAPITRE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	6
I.1. INTRODUCTION :	6
I.2. Types de ciment :	7
I.2.1. Ciment portland artificiel (CEM I) :	7
I.2.2. Ciment portland composé (CEM II) :	7
I.2.3. Ciment de Haut Fourneau CEM III:	7
I.2.4. Ciment pouzzolaniques CEM IV	7
I.2.5. Ciment composé CEM V:	7
I.3. Hydratation de ciment :	8
I.3.1. Hydratation des Silicates De Calcium, C ₃ S Et C ₂ S :	9
I.3.2. Hydratation des Aluminates de Calcium, C ₃ A et C ₄ AF	9
I.4. Réactivité des autres constituants du ciment (les additions minérales) :	10
I.4.1. la pouzzolane :	10
I.4.2. Laitier :	11
I.4.3. Fumées de silice(D):	12
I.4.4. Calcaires:	13
I.5. Argiles :	13
I.5.1. Les grandes familles de minéraux argileux :	14
I.5.2. Classification et nomenclature des minéraux argileux :	14
I.5.3. Types de minéraux argileux :	15
I.5.4. Espèces de minéraux argileux :	16
I.5.5. Minéraux à couches discontinues et à faciès fibreux :	16
I.5.6. Relation entre la taille des particules fines et leurs natures minéralogiques :	17
I.6. Argiles calcinées :	17
I.6.1. Mode d'obtention :	18
I.6.2. Composition minéralogique :	19

I.6.3. Domaine d'utilisation :	19
I.6.3.1. Matériaux de construction :	20
I.6.3.2. Utilisation général :	20
I.6.4. Rôle de l'argile calcinée :	21
I.6.5. Réactivité pouzzolanique des argiles calcinées :	22
I.7. Conclusion :	22
REFERENCE :	23
CHAPITRE II : LA BENTONITE	25
II.1. Introduction :	25
II.2. Origines de la bentonite :	26
II.3. Structures de la bentonite :	26
II.4. Types de bentonite :	27
II.5. Bentonite naturelle :	27
II.6. Bentonites activées :	28
II.7. Fonction de bentonite :	28
II.8. Avantage de bentonite :	29
II.9. Propriétés de bentonite :	29
II.9.1. Propriétés de gonflement :	29
II.9.2. Etat colloïdal :	30
II.9.3. Capacité d'échange cationique :	30
II.10. Capacité de gonflement et d'adsorption d'eau :	30
II.11. Les domaines d'utilisation de la bentonite :	31
II.12. Conclusion :	32
III.7. REFERENCES :	33
CHAPITRE III : MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES	36
III.1. Introduction :	36
III.2. Caractérisation des matériaux utilisés :	36
III.2.1. Ciment :	36
III.2.2. Bentonite :	37
III.2.2.1. Préparation de la bentonite :	37
a) Bentonite broyée mécaniquement	37
b) Calcination thermique :	40
III.3. Méthode de formulation de la pate cimentaire :	41
III.4. Méthodes expérimentales :	42
III.4.1. Variation de la masse :	42
III.4.2. Essai de compression :	43
III.4.3. Absorption capillaire :	44
III.4.4. Porosité accessible à l'eau :	45
III.5. Conclusion :	46

.	
CHAPITRE 4 : RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATIONS	47
IV.1. INTRODUCTION :	47
IV.2. La Masse volumique:	47
IV.2. RESISTANCE A LA COMPRESSION :	48
IV.4. PROPRIETES PHYSIQUES :	49
IV.5. Porosité accessible a l'eau :	50
IV.6. CONCLUSION	51
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	52
ANNEXE A	

LISTE DES FIGURES

INTRODUCTION GENERALE

Figure 1 - les gaz à effet de serre	1
Figure 2 - l'émission de dioxyde de carbone.	2
Figure 3 - Additions Minérales	3

CHAPITRE I: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Figure I.1 la pouzzolane	10
Figure I.2 Laitier granulé de haut fourneau	11
Figure I.3 - Fumée de silice	12
Figure I.4- Schématisation d'un feuillet, d'une couche, et d'un plan d'atomes	15

CHAPITRE 2 : LA BENTONITE

Figure II.1- Structure idéale de la montmorillonite et de la beidellite	27
---	----

CHAPITRE 3 MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES

Figure III.1 - Sac de ciment CEM I / A 42,5.....	36
Figure III.2- Bentonite après le séchage.	37
Figure III.3 - Appareil Micro-Deval.	38
Figure III.4 - la bentonite et les boulets sphériques.	38
Figure III.5- les boulets à mélanger avec la bentonite dans les cylindres creux.....	39
Figure III.6 - Time-tronic.	39
Figure III.7 - la bentonite après un broyage mécanique.	40
Figure III.8 - Four à moufle.	40
Figure III.9 - Bentonite broyée	41
Figure III.10 - Bentonite calcinée	41
Figure III.11 - Ciment avec le substitut de la bentonite.	42
Figure III.12 - Eprouvettes pate de ciment	42
Figure III.13 - Balance de 0.01 g.	43
Figure III.14 - Dispositif de résistance à la compression	44
Figure III.15- Dispositif expérimental de l'essai d'absorption capillaire.....	45
Figure III.16 - Dispositif de mesure de la porosité accessible à l'eau.....	46

CHAPITRE 4 : RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATIONS

Figure IV.1- Résistance à la compression à 30 jours.	48
Figure IV.2 - Absorption capillaire à 90 minutes.	49
Figure IV.3 – Porosité accessible à l'eau.	50

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	6
Tableau I.1 - Tableau I.1-Les cinq types des ciments courants et leur composition.	8
Tableau I.2 – Tableau I.2. Relation entre la taille et la nature de minéraux	17
CHAPITRE 4 : RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATIONS	47
Tableau IV.1 – Masse volumique	47

Introduction General

Le développement durable, compris comme un progrès qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre à leurs besoins, est désormais l'idée de base du paradigme actuel du progrès technologique. La plus grande menace pour la réalisation des objectifs de développement durable est l'émission excessive de gaz à effet de serre, y compris, surtout, de dioxyde de carbone CO_2 , qui entraîne un réchauffement de la planète avec de nombreuses conséquences négatives graves pour le développement futur et ses perspectives (Figure 1).

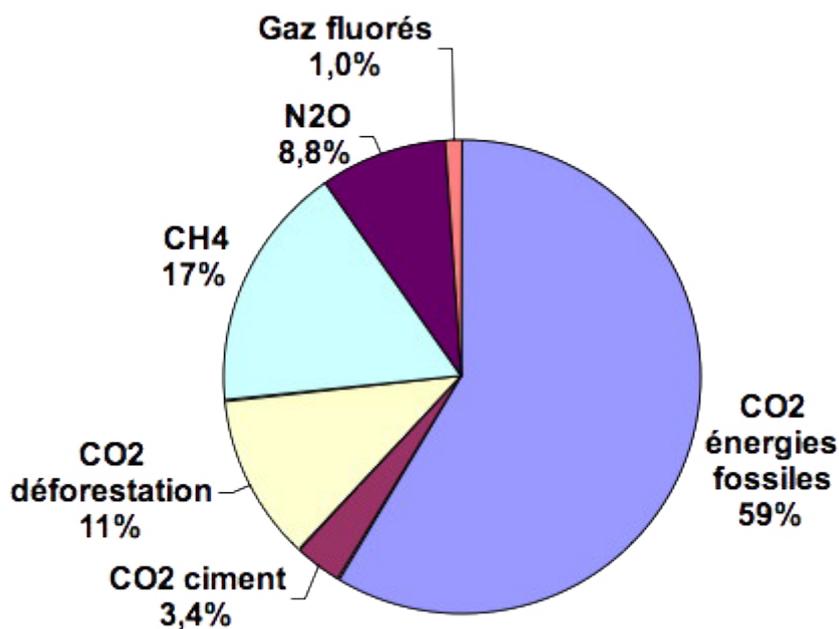


Figure 1- les gaz à effet de serre [1].

L'industrie du bâtiment contribue de manière significative à l'augmentation de la teneur en dioxyde de carbone dans l'atmosphère, la production de ciment représentant 5% des émissions mondiales de dioxyde de carbone [1] étant sa principale source Figure 2. Cela est dû, d'une part, à la forte intensité énergétique du processus de production de clinker Portland.

La production d'une tonne de clinker nécessite un apport de 3,1 à 3,8 GJ de chaleur, alors que dans les fours à méthode humide de l'ancienne génération, la demande peut même atteindre 6 GJ / t [1]. En revanche, lors de la production de ciment, le dioxyde de carbone est émis par les matières premières, principalement le calcaire. La quantité de cette émission est d'environ 0,53 kg / kg de clinker [1].



Figure 2 - L'émission de dioxyde de carbone [1].

En général, on utilise le laitier de haut fourneau, pouzzolanes, tuf etc comme ajout (Figure 3). Les pouzzolanes sont des matériaux silico-alumineux, qui en présence d'eau, réagissent avec l'hydroxyde de calcium pour former des composés « hydratés » possédant les propriétés des ciments [2,3]. Ce sont des produits naturels d'origine volcanique (cendre, scorie...) ou artificiels obtenus par différentes méthodes [4]. Les plus couramment employées sont les cendres volantes des centrales thermiques, les laitiers des hauts fourneaux, les bauxites et les argiles calcinées. Les avantages du remplacement partiel du ciment par des matériaux pouzzolaniques sont divers : le renforcement de la résistance aux attaques chimiques, renforcement de l'imperméabilité et de la durabilité du mortier, réduction des réactions alcalines avec les agrégats [5,6].



Pouzzolane



Laitier du haut fourneau



Filler calcaire

Figure 3 – Additions Minérales.

Les argiles calcinées sont devenues plus populaires ces dernières années en tant qu'alternative à l'utilisation massive du ciment car la calcination a besoin de moins d'énergie pour activer l'argile qu'il n'en faut pour produire du ciment, et il est disponible dans le monde entier. Il peut être obtenu en appliquant un traitement thermique entre 700 et 900 C [7]. Plusieurs études [8, 9, 10] ont évalué l'utilisation de ces matériaux sous forme de kaolinite, smectite, muscovite, illite et la montmorillonite comme substitut de l'OPC dans de nombreuses applications. Ils ont constaté qu'il améliorait la maniabilité, réduisait la chaleur d'hydratation, développait plus de résistance et au fil du temps réduisait les dommages structurels pendant leur durée de vie causés par la carbonatation, le gel / dégel et la pénétration de chlorure et de chlorure. Gaz.

La bentonite est une argile naturelle disponible dans de nombreux pays ; il est principalement composé de montmorillonite et d'autres minéraux tels que les feldspaths, la cristobalite, le verre volcanique et le quartz cristallin [11,12]. Structurellement, la montmorillonite est classée comme aluminosilicate en couches 2: 1 et consiste idéalement en une feuille octaédrique d'alumine entre deux feuilles tétraédriques de silice [11,12].

D'une manière générale, la littérature sur l'activation des minéraux argileux et leur utilisation en génie civil est très riche et couvre un large éventail de problématiques

Tout d'abord, elle se concentre sur les argiles calcinées utilisées comme additions dans les liants, où le ciment est le composant dominant, et dans le béton à base de ciment.

Cependant, une meilleure compréhension des paramètres de d'activation qui déterminent les propriétés des argiles calcinées, nécessite des données supplémentaires. Par conséquent, la présente étude présente une évaluation technologique de deux types d'activation : processus mécanique, suivi par processus thermique sur la bentonite, des pâtes de ciment mélangé fabriqués à partir de la bentonite activé ont été testés, y compris la détermination les caractéristiques physiques et mécaniques.

CONTEXTE :

Le travail est divisé en quatre chapitres. Le premier chapitre décrit une connaissance fondamentale des minéraux argileux. : présentera une synthèse bibliographique sur l'activation des minéraux argileux en mettant l'accent sur le processus de calcination et la recherche des mécanismes d'hydratation et de l'activité pouzzolanique avec les facteurs qui les influencent sont présentés.

Dans le deuxième chapitre suivant, une partie distincte est consacrée à l'identification de la bentonite

Le troisième chapitre nous décrit les caractéristiques physiques et chimiques des matériaux utilisés. Nous présentons le programme expérimental adopté et l'approche méthodologique relative au choix et enfin nous décrivons les différents paramètres et grandeurs mesurées (résistance à la compression, absorption capillaire).

Le quatrième chapitre présente les résultats et les interprétations des différents paramètres obtenues après 30 jours pour les différents pourcentages.

REFERENCE :

- [1] Damtoft, J.S.; Lukasik, J.; Herfort, D.; Sorrentino, D.M.; Gartner, E.M. *Sustainable development and climate change initiatives*. *Cem. Concr. Res.* **2008**, *38*, 115–127.
- [2] Chahidi Elouazzani D., *Caractérisation physico-chimique et valorisation en bâtiment et travaux publics des cendres issues de l'incinération des boues de papeterie*, thèse de Doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon, 2005, P 18-21.
- [3] Sobolev K., Naik T.R., *Performance as a factor for sustainability of the cement industry*, Report N° CBU-2005-17, Rep-588, August 2005.
- [4] Chinje Melo U., Billong N., *Activité pouzzolanique des déchets de briques et tuiles cuites*, *African Journal of Science and Technology (AJST)*, Science and engineering Series Vol. 5, N°1, 2004, P 92-100.
- [5] Bessa A., Bigas J.P., Gallias J-L., *Evaluation de la contribution liante des additions minérales à la porosité, à la résistance en compression et à la durabilité des mortiers*, 22^{ème} rencontres universitaires de génie civil 2004, P 1-8.
- [6] Bich C., *Contribution à l'étude de l'activité thermique du kaolin : Evolution de la structure cristallographique et activité pouzzolanique*, thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon, 2005, P 44-45.
- [7] H. Darweesh, Z. Nagieb, *Hydration of Calcined Bentonite Portland Blended Cement Pastes*, 2007
- [8] S. Mohammed, *Processing, effect and reactivity assessment of artificial pozzolans obtained from clays and clay wastes: a review*, *Constr. Build. Mater.* *140* (2017) 10–19..
- [9] M. Said-Mansour, E.-H. Kadri, S. Kenai, M. Ghrici, R. Bennaceur, *Influence of calcined kaolin on mortar properties*, *Constr. Build. Mater.* *25* (5) (2011) 2275– 2282.
- [10] M. Shekarchi, A. Bonakdar, M. Bakhshi, A. Mirdamadi, B. Mobasher, *Transport properties in metakaolin blended concrete*, *Constr. Build. Mater.* *24* (11) (2010) 2217–2223.
- [11] S. Ahmad, S. Barbhuiya, A. Elahi, J. Iqbal, *Effect of Pakistani bentonite on properties of mortar and concrete*, *Clay Miner.* *46* (1) (2011) 85–92.
- [12] M. Sakizci, B.E. Alver, E. Yörükoğullari, *Thermal behavior and immersion heats of selected clays from Turkey*, *J. Therm. Anal. Calorim.* *98* (2) (2009) 429.

CHAPITRE I :

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. Introduction :

L'argile constitue avec le calcaire les matières premières nécessaires pour la fabrication d'un ciment. Elle participe à travers ses oxydes SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3 dans le processus de clinkerisation. C'est à partir de la combinaison de ces oxydes avec la chaux (CaO) que le clinker forme, après cuisson à $1450\text{ }^\circ\text{C}$, ses principaux minéraux C_3S , C_2S , C_3A et C_4AF . L'utilisation des argiles peut également avoir lieu dans une phase plus avancée lors de la fabrication d'un ciment Portland composé CEM II. Il s'agit de leur incorporation comme additions, par le remplacement partiel du clinker [1], ou comme adjuvants par substitution du ciment [2]. L'utilisation des argiles comme addition et/ou adjuvant a pour objectif l'amélioration des performances physicomécaniques des ciments à travers leur propriété pouzzolanique, physique et/ou chimique. La pouzzolanité physique des argiles [3] est liée à leur finesse qui est plus importante que celle de clinker, ce qui permet de réduire la porosité des mortiers et d'améliorer leur résistance et durabilité. Or, la pouzzolanité [4] de ces matériaux ne peut se manifester qu'après un traitement approprié, dont le plus utilisé est le procédé thermique «calcination».

I.2. Types de ciment :

L'industrie de ciment est tenue par des exigences qu'elle doit respectées, certaines sont montrées dans le Tableau I.1.

I.2.1. Ciment portland artificiel (CEM I) :

C'est le produit résultant de la mouture de clinker, obtenu par la cuisson dans des conditions de durée et de températures suffisantes d'un mélange soigneusement homogénéisé et dosé, dans les principaux constituant sont : la silice, l'alumine, l'oxyde de fer et la chaux [7].

I.2.2. Ciment portland composé (CEM II) :

Le ciment portland composé contient au moins 65 % de clinker, 5 % de constituant secondaires, et des ajouts avec 30 % on a, par convention [8]: (clinker) + (autres constituants) + (constituants secondaires) =100 le ciment est le résultat du broyage d'un certain nombre de constituants qui peuvent se répartir en différentes.

I.2.3. Ciment de Haut Fourneau CEM III:

Un mélange de clinker avec laitier granulé d'HF teneur minimale 36% [10].

I.2.4. Ciment pouzzolaniques CEM IV:

Constitué d'un mélange de clinker, de pouzzolane et de cendre doit en plus satisfaire à l'essai de pouzzolanité» [10].

I.2.5. Ciment composé CEM V:

Constitué d'un mélange de clinker, de laitier granulé et d'autres constituants secondaires. [10].

Tableau I.1-Les cinq types des ciments courants et leur composition (NFP15-301) [2].

Notion	Clinker(K)	Autres constituants	Constituants secondaires
Ciment Portland			
CPA-CEMI	95-100	-	0-5
Ciment Portland Composé			
CPJ-CEMII/A	80-94	6-20*	-
CPJ-CEMII/B	65-79	21-35*	-
* Les constituants autres que les clinkers sont: -(S), (Z), (V),(W),(T),(L); (D), en proportion limitée à 10%; (F), en proportion limitée à 5% (constituants secondaires comptés avec les autres constituants).			
Ciment de haut fourneau			
CPF-CEMIII/A	35-64	36-65*	0-5
CPF-CEMIII/B	20-34	66-80*	0-5
CLK-CEMIII/C	5-19	81-95*	0-5
*Laitier granulé de haut fourneau (S) uniquement			
Ciment Pouzzolanique			
CPZ-CEMIV/A	65-90	10-35*	0-5
CPZ-CEMIV/B	4-64	36-55*	0-5
*Les constituants autres que le clinker sont: -Les pouzzolanes naturelles(Z) et les cendres volantes siliceuses(V); -Les fumées de silice (D), en proportion limitée à 10%			
Ciment au Laitier et aux Cendres			
CLC-CEMV/A	40-94	18-30*	0-5
CLC-CEMV/B	20-39	31-50*	0-5
Pouzzolanes naturelles Z) ou cendres volantes siliceuses(V)			

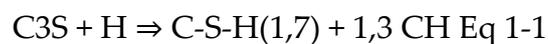
I.3. Hydratation de ciment :

Le mélange du ciment avec de l'eau provoque la dissolution des anhydres du ciment jusqu'à la sursaturation des hydrates qui, moins solubles que les anhydres, précipitent. La pâte obtenue est appelée pâte de ciment durcie. Ce processus est bien le résultat d'un ensemble de réactions chimiques.

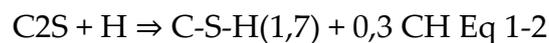
I.3.1. Hydratation Des Silicates De Calcium, C₃S Et C₂S :

En solution, le C₃S se dissout libérant des ions calcium et hydroxyde ainsi que du silicium. Une fois la limite de solubilité des C-S-H atteinte, ces derniers précipitent avec en moyenne un rapport calcium sur silicium (C/S) de 1,7 pour un ciment de Portland [7]. Cette réaction, limitée par le silicium, ne consomme pas tous les ions calcium en solution. Une fois la limite de solubilité de l'hydroxyde de calcium atteinte, ce dernier précipite sous la forme de portlandite.

L'ensemble de ces réactions peut être résumé par l'équation bilan suivante (Eq 1-1).



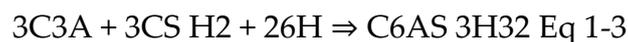
Suivant le même processus, la dissolution du C₂S conduit également à la de C-S-H et de portlandite. Apportant moins de calcium en solution, la précipitation de portlandite est plus faible en comparaison avec la même quantité de départ de C₃S. L'équation bilan Eq 1-2 résume ce processus.



Ces réactions sont exothermiques et catalysent la suite de l'hydratation du ciment.

I.3.2. Hydratation des Aluminates de Calcium, C₃A et C₄AF :

Le C₃A est l'anhydre du clinker le plus réactif. L'ajout de sulfate de calcium, généralement du gypse (sulfate de calcium dihydraté), au clinker favorise la précipitation de sulfoaluminates hydratés dont la limite de solubilités est plus basse que celles des phases aluminate de calcium hydraté. La phase la moins soluble est ainsi le trisulfoaluminate de calcium aussi appelé ettringite. L'équation bilan Eq 1-3 résume ce processus.



Les ions aluminates non consommés par cette réaction interviennent dans la précipitation des aluminates de calcium hydratés et, en présence de carbonates, du monocarboaluminate de calcium. Si les aluminates de calcium anhydres sont en excès par rapport au gypse, les ions sulfate font défaut. L'ettringite formée se dissout au profit du monosulfoaluminate de calcium selon l'équation bilan Eq 1-4.



Le gypse agit comme un régulateur de prise. Il semble que les aiguilles d'ettringite se forment autour des grains d'anhydrite et ralentissent son hydratation.

Une faible proportion de C_3A améliore la résistance du matériau cimentaire à l'attaque sulfatique, en limitant le stock d'aluminium, élément nécessaire à la précipitation d'ettringite [7].

Les vitesses de réaction des réactions décrites ci-dessus sont différentes, de la plus rapide à la plus lente : dissolution du C_3A , du C_3S , du C_2S puis du C_4AF [10].

I.4. Réactivité des autres constituants du ciment (les additions minérales) :

I.4.1. la pouzzolane :

Ce sont des produits naturels d'origine volcanique composés essentiellement de silice, d'alumine et d'oxyde ferrique ; ils sont employés en cimenterie pour leurs propriétés « pouzzolaniques » c'est-à-dire une aptitude à fixer la chaux à une température ambiante et à former des composés ayant des propriétés hydrauliques, c'est-à-dire pouvant faire prise en durcir par hydratation (désignation abrégé : Z) [11].

On obtient artificiellement des pouzzolanes à partir d'argile cuite par exemple. Les cendres des centrales thermiques (cendres volantes) constituent également des matériaux à caractères pouzzolaniques.



Figure I.1- la pouzzolane

I.4.2. Laitier :

C'est un résidu minéral de la préparation de la fonte dans les hauts fourneaux à partir du minerai et du coke métallurgique. Il sort du trou de coulée à une température de l'ordre de 1500°C. Figé par refroidissement brusque il donne un produit granulé qui est ajouté au clinker en proportion variable pour être broyé finement avec lui. il contient de la chaux (45 à 20 %), de la silice (25 à 30%), de l'alumine (15 à 20%) et 10% environ de magnésie, oxyde divers et manganèse. le laitier est un véritable ciment manifestant lui-même des propriétés hydraulique, grandement activés d'ailleurs par la présence de clinker. son hydratation qui se traduit par le développement des résistances mécaniques est moins rapide que celle que du Portland surtout dans sa période initial. elle dégage parallèlement moins de chaleur et accuse une sensibilité plus marquée aux variations de température (abaissement ou élévation) [11].

Le laitier retient un peu moins bien l'eau de gâchage que le portland et craint donc davantage la dessiccation. Mais chimiquement, il résiste normalement mieux tant à l'action destructrice des sulfates, qu'à la dissolution de la chaux par les eaux pures ou chargées de certains sels, ainsi que par celles contenant du gaz carbonique agressif.



Figure I.2 - Laitier granulé de haut fourneau [14].

I.4.3. Fumées de silice(D):

Sous-produit de la fabrication du silicium, du ferro-silicium et des silico-alliages. Les particules amorphes, ont des dimensions de 0,01 à 1mm.

Jusqu'en 1985, cette silice n'était pas valorisée. Ces "poussières" étaient d'abord rejetées dans l'atmosphère puis, pour protéger l'environnement, récupérées par filtration des fumées et placées en décharge.

Utilisée dans les bétons pour : augmenter la fluidité, la résistance en compression, et diminuer la porosité et la perméabilité ; car la présence de fumée de silice accélère la réaction d'hydratation du ciment et favorise la création de sites de germination de cristaux de portlandite Ca(OH)_2 dès les premières minutes qui suivent le début de la réaction [12].

Elles ne sont pas généralement utilisées en tant qu'ajout, mais plutôt avec des dosages appropriés aux besoins. C'est un produit très efficace pour la fabrication des bétons à très haute performance.



Figure I.3 - Fumée de silice [14].

I.4.4. Calcaires:

Pour pouvoir être considérés comme un constituant principal du ciment, les calcaires doivent être composés de 75% au moins de CaCO_3 [13]. Et dont la teneur en TOC (Total Organique Carbone) est limitée:

Si ce TOC est < 0.20 % désignation abrégée : LL

Si ce TOC est $< 0.50\%$ désignation abrégée :L

Un béton confectionné avec un ciment contenant des proportions élevées en calcaire à haute teneur en TOC risque de ne pas accuser une haute résistance au gel-dégel [14].

I.5. Argiles :

L'argile design un matériau naturel composé principalement de minéraux à cristallites très fines (en général inférieur de $2\mu\text{m}$). Sa formation est liée aux altérations physiques, chimiques et biologiques qui affectent les roches massives mères. La composition chimique des argiles est très semblable à la décomposition moyenne de la surface terrestre. Celle-ci est composée d'au moins de 50% de silicates d'alumine plus ou moins hydratés, avec la présence de quelques minéraux associés comme des oxydes et hydroxydes de fer, carbonates, quartz.... Les argiles sont aussi souvent associées avec la matière organique sous forme de complexes argilo-humiques. Les argiles sont caractérisées par une structure feuilletée (phyllosilicates) ou une structure fibreuse (sépiolite et palygorskite). Grace à divers propriétés physico-chimiques comme la grande surface spécifique, la plasticité, la capacité d'adsorption d'eau et de gonflement, la faible perméabilité, les argiles peuvent être appliquées dans plusieurs domaines comme la fabrication de matériaux de construction, la cosmétique, la dépollution des eaux ou le stockage des déchets y compris les déchets nucléaires.

I.5.1. Les grandes familles de minéraux argileux :

Les minéraux de l'argile se répartissent principalement en quatre grandes familles [27], qui sont :

- Famille du kaolin $Al_4 [(OH)_8Si_4O_{10}]$;
- Famille des micas: di octaédrique $K_2Al_4 [Si_6Al_2]O_{20}(OH)_4$ tri octaédrique $K_2Mg_6 [Si_6Al_2]O_{20}(OH)_4$;
- Famille de la montmorillonite $Al_2 [(OH)_2Si_4O_{10}] .xH_2O$;
- Famille des chlorites : entre deux feuillets de type talc se place un feuillet de type brucite $Mg(OH)_2$, d'où des formules du type $(Mg,Al)_3 [(OH)_2AlSi_3O_{10}] Mg_3(OH)_6$

I.5.2. Classification et nomenclature des minéraux argileux :

Les argiles sont des roches constituées de variétés de minéraux très fins auxquels viennent s'ajouter des minéraux non argileux tels que le quartz, minéraux lourds, matières organiques

Du point de vue chimique, ces minéraux sont des silicates d'alumine qui se présentent sous forme de feuillets. L'empilement de ces feuillets constitue le grain dont la dimension est généralement inférieure à $2 \mu m$ [28].

Les argiles sont classées en différents groupes de minéraux selon l'épaisseur de leurs feuillets.

Minéraux à 7 \AA : Le feuillet est constitué d'une couche tétraédrique et d'une couche Octaédrique. Son épaisseur est d'environ 7 \AA ;

Minéraux à 10 \AA : Le feuillet est constitué de deux couches tétraédriques et d'une Couche octaédrique. Son épaisseur est d'environ 10 \AA ;

Minéraux à 14 \AA : Le feuillet est constitué de couches octaédriques interfoliaires [29].

I.5.3. Types de minéraux argileux :

Selon le nombre de couches octaédriques(O) et tétraédriques (T), on distingue trois principaux types de minéraux [22,23] :

Les minéraux de type 1 :1 à une couche d’octaèdres et une couche de tétraèdre (succession de trois couches d’oxygènes constituent le feuillet). L’équidistance caractéristique est d’environ 7.1Å. A ce type correspond le groupe de la kaolinite.

Les minéraux de type 2 :1) à une couche d’octaèdres encadrée par deux couches tétraédriques (succession de quatre couches d’oxygènes constituent le feuillet).

L’équidistance caractéristique varie de 9.4 à 15 Å selon le contenu de l’inter feuillet. Ace groupe correspondent les groupes du talc, des smectites, vermiculites et celui des micas.

Les minéraux de types 2 :1 :1 à une couche d’octaèdres encadrée par deux couches tétraédriques et un entre feuillet constitué par une couche d’octaèdre (succession de six couches d’oxygène constituent le feuillet) l’équidistance caractéristique est alors d’environ 14Å ; à ce type correspond le groupe de la chlorite.

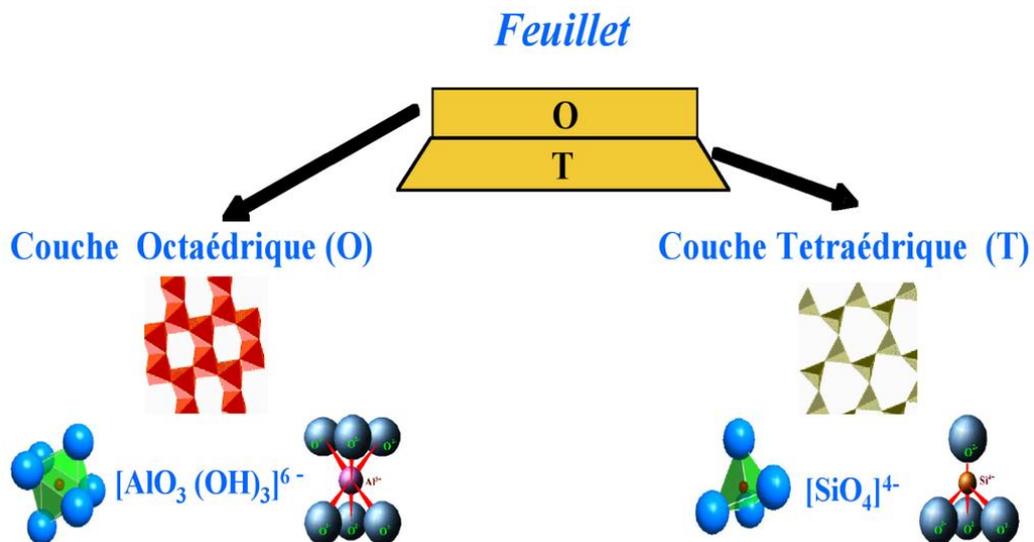


Figure I.4- Schématisation d’un feuillet, d’une couche, et d’un plan d’atomes.

I.5.4. Espèces de minéraux argileux :

Selon la nature et donc l'épaisseur de l'inter feuillet on distingue les principales espèces de minéraux argileux suivantes :

1 :1 (ou T_O) sans inter feuillet, l'équidistance réticulaire est alors de 7.1A ; exemple la kaolinite.avec de l'eau comme inter feuillet, l'équidistance réticulaire est de 10.1A ; c'est le cas de l'halloysite.

2 :1 (T_O_T) sans inter feuillet, l'équidistance réticulaire varie de 9.2 à 9.3 A ; exemple de la pyrophyrite .Avec un inter feuillet constitué de cation ; l'équidistance de base est de 10A : exemple de micas. Avec des cations alcalins ou alcalino -terreux fortement hydratés dans l'inter feuillet, l'équidistance réticulaire varie de 14 à 15 A : c'est le cas des vermiculites et des smectites.

2 :1 :1 (ou T_O_T_O) avec un inter feuillet constitué d'octaèdres de type brucite, l'équidistance réticulaire est de 14.2A ; exemple des chlorites.

La plus part des groupes de minéraux se divisent en deux sous-groupes principaux ; les minéraux dioctaédriques et les minéraux trioctaédriques. La distribution entre les deux sous-groupes se fait à partir de la composition des couches d'octaèdres ; si les six valences négatives du site octaédrique sont compensées par trois cations divalents tels que Fe^{2+} ou Mg^{2+} , la couche est dite trioctaédriques. Si la compensation est assurée par deux cations trivalents comme Fe^{3+} ou Al^{3+} , on a une structure dioctaédriques [22].

I.5.5. Minéraux à couches discontinues et à faciès fibreux :

Ces minéraux appartiennent à la famille de la sépiolite ou de la palygorskites. Ils possèdent ce caractère commun d'être constitués par des couches d'oxygène hexagonales continues, séparées alternativement par deux couches d'oxygène à assemblage compact dont l'empilement forme des octaèdres mais qui s'étendent en un long ruban, la croissance étant limitée à une dimension. C'est la largeur de ce ruban qui caractérise chacune des feuillets. Ces rubans sont disposés alternativement

Au-dessus ou au-dessous de la couche continue d'oxygène à assemblage hexagonal, de sorte que la structure présente en coupe ; l'aspect d'une brique creuse [22].

C'est cette disposition qui se trouve caractérisée par l'expression « minéraux à couches discontinues » par opposition avec les minéraux étudiés jusqu'à présent.

I.5.6. Relation entre la taille des particules fines et leurs natures minéralogiques :

(D'après Mitchell 1976) Il existe une infinité de types d'argiles selon les proportions des minéraux [22,23], donc on peut connaître approximativement la nature du minéral d'après la dimension des particules comme indiqué au Tableau I.2.

Tableau I.2. Relation entre la taille et la nature de minéraux [23].

Dimension	Minéraux dominants	Minéraux courants	Minéraux rares
0.1 µm	Montmorillonite	mica	illite
0.1 à 0.2µm	mica	Kaolin Montmorillonite	Illite quartz
0.2à 2 µm	kaolinite	Illite Mica halloysite	Quartz Montmorillonite illite
2 à 11 µm	Mica Illite feldspaths	Quartz Kaolinite	Halloysite Montmorillonite

I.6. Argiles calcinées :

La calcination des argiles consiste à les mettre sous l'effet des hautes températures (400 à 900 °C) pendant quelques heures (2 à 5 h). L'argile, vue sa variété minéralogique, peut connaître plusieurs phénomènes à l'occasion de sa calcination : l'évaporation de l'eau libre [5], la transformation du Quartz α en Quartz β [6], la déshydroxylation des phyllosilicates, la décomposition des matières organiques, la

décarbonatation des carbonates...etc. C'est principalement le phénomène de déshydroxylation qu'on vise à travers toute calcination. Il s'agit d'arracher l'eau chimiquement liée que comportent les minéraux phylliteux d'une argile. Ces molécules d'eau proviennent des groupements d'hydroxyle (O-H) que contiennent les tétraèdres de silice et les octaèdres d'alumine, composants élémentaires des minéraux phylliteux. C'est après leur déshydroxylation que les oxydes, SiO_2 et Al_2O_3 , deviennent réactifs et peuvent réagir avec la chaux dans une réaction qu'on nomme réaction pouzzolanique.

I.6.1. Mode d'obtention :

Les pouzzolanes sont classées en deux groupes : naturelles et artificielles. Les pouzzolanes naturelles proviennent surtout des roches volcaniques dans lesquelles le constituant amorphe est le verre produit lors de refroidissement suivant la fusion. Les pouzzolanes artificielles les plus couramment utilisées sont les cendres volantes de centrales thermiques. Les fumées de silice, la bauxite calcinée.

Transformation thermique : un des moyen les plus utilisé pour obtenir de la pouzzolane artificielle est la calcination, dont l'analyse thermique différentielle (ATD) et le moyen adéquat pour suivre l'évolution des transformations au cours de la calcination, et qui met en évidence trois phénomènes.

La déshydrations : pic endothermique de faible amplitude vers 100°C , elle ne modifie en rien la structure cristallographique, mais permet seulement le départ de l'eau physiosorbée.

Les dés hydroxylation (phase de désorganisation) : pic endothermique de grande amplitude vers 500°C à 700°C . A ce niveau les hydroxyles sont éliminés de la structure. Il se forme pour le kaolin une phase appelée métakaolin, pour une argile hétérogène, il se forme une phase différente suivant les minéraux qui la compose. [18,19]. Donc la température de décomposition dépend de la nature des minéraux de la pression de vapeur maintenu pendant la cuisson [20,21].

C'est dans cette phase que l'argile devient amorphe et par conséquent pouzzolanique. La recristallisation : pic exothermique vers 900°C à 1200°C. Le matériau passe d'une phase amorphe à une phase de recristallisation suivi d'un changement de la nature initiale des minéraux. L'argile dans cette phase devient inerte. Le métakaolin subit dans cette phase un réarrangement structurel [21, 22,23,]

I.6.2. Composition minéralogique :

L'analyse minéralogique a pour but l'identification et le dosage des minéraux. Elle apporte des renseignements sur le mode de combinaison des éléments. Si toutes .fois la reconnaissance de la composition chimique. Il n'est pas facile d'identifier les espèces minérales en raison de la complexité de leur mélanges, on peut trouver plus d'un minéral qui présent une intensité de pic (raie) principale identique à un autre. Voinvith [24]. En effet un minéral peut être caractérisé par :

- Sa structure cristalline : qui est un arrangement des atomes dans un réseau géométrique régulier (le kaolin en feuillet à double Couche $e=7\text{Å}$).
- Sa morphologie : qui est la taille et la forme des particules ainsi que les défauts (dislocation, joints de grains, etc. . .) qui peuvent être déterminé par le microscope électronique.
- Sa micro-composition élémentaire approchée qui peut être déterminé par le microscope électronique à balayage équipé d'un spectromètre X d'après terrier [24]

I.6.3. Domaine d'utilisation :

Les propriétés des argiles ont été reconnues et utilisées depuis la plus haute antiquité. Nos ancêtres de la préhistoire fabriquaient des poteries rudimentaires et des outils en silex.

I.6.3.1. Matériaux de construction :

L'argile calcinée est la matière première principale avec quelques additions de sable, de chamotte comme fondant dans la fabrication des briques, tuiles et céramiques [25].

Les argiles peu fusibles sont réfractaires entre 1350 °C à 1580°C servent pour la fabrication des briques, des carreaux de sol et les tuyaux d'évacuation [25].

Les argiles fusibles sont réfractaires au-dessous de 1350°C servent pour la fabrication des briques, et tuiles. [25].

L'argile peut être utilisée comme ajout pouzzolanique dans la fabrication des ciments avec addition minérales à un taux de substitution de 30 % environ [15,20].

I.6.3.2. Utilisation général :

La composition d'une solution saline est modifié au contact d'argile des cations « disparaissent » et sont remplacés par d'autre empruntés à l'origine elle-même ; c'est le phénomène d'échange des cations.

Les argiles servent aussi à diluer les pesticides utilisés en agriculture lors de leur épandage. Le pesticide, transport, stockage et application.

Les argiles du groupe des smectites (montmorillonite) ou encore la sépiolite et la palygorskite sont utilisées dans l'industrie pour leur propriétés d'absorption et d'adsorption.

- Absorption des huiles et graisses (sols des garages, d'usine ...), dégraissage.
- décoloration des huiles et usage comme liant pour les aliments du bétail.
- Usage pharmaceutique (excipients, pansement gastro-intestinaux...).
- Boues de forage en milieu salin, engrais en suspensions.
- Les interstratifiées smectites -kaolinite servent en fonderie comme liant des sable de moulage.

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

- Les catalyseurs argileux dans les crackings des produits pétroliers.

- Les propriétés catalytiques de la montmorillonite dans la formation des aminacides et dans leur polymérisation en peptides.
- Les essais de polymérisation du benzène en polyparaphénylène dans une montmorillonite.
- les tentatives de polymérisation du styrène du méthacrylate de méthyle et d'autres composés organiques non saturés sur les surfaces de certains minéraux argileux . De l'étude comparative des activités catalytique de divers minéraux argileux certains mélanges kaolinite – palygorskite – illite – montmorillonite donnent des résultats satisfaisant.
- Les argiles kaolinitiques non modifiées ont un caractère semi- renforçateur des gommes naturelles, ce pouvoir d'autant plus grand que les argiles utilisées est pur et bien cristallisées. La teneur en kaolinite est favorable et semi-renforcement tandis que les teneurs en quartz et en mica lui sont défavorables.
- l'industrie papetière a connue depuis une cinquantaine d'année, un développement considérable qui la place au premier rang que des consommateurs de kaolin, en papeterie l'utilisation se répartir entre le kaolin de masse, servant à améliorer les propriétés optiques de la trame cellulosique et les kaolins de couchage qui assurent la qualité et l'aspect esthétique de l'impression. Plus récemment sont apparus les cations couchés dans la fabrication d'emballages supports publicitaires.
- l'industrie céramiques du bâtiment utilisatrices d'argiles kaolinitiques, les carreaux de grés céramique par exemple sont soumis à des conditions d'utilisation particulière, on recherche alors une résistance mécanique élevée et une bonne régularité des produits.

I.6.4. Rôle de l'argile calcinée :

La structure amorphe de l'argile calcinée entre 600°C et 850°C lui acquiert des propriétés pouzzolanique. Un remplacement d'un pourcentage du ciment portland dans les mortiers et les bétons peut être envisagée, car la rend capable de réagir avec

la portlandite libérée par l'hydratation du ciment portland pour produire des hydrates de nature proche de ceux du ciment qui contribuent à l'augmentation de la résistance mécanique.

La calcination d'une argile constituée d'un réseau cristallin très désorganisé, conduit à de bonnes performances pouzzolaniques [20, 21,26] L'activité pouzzolanique augmente avec l'amorphisation des réseaux minéralogiques de l'argile calcinée.

I.6.5. Réactivité pouzzolanique des argiles calcinées :

Les argiles calcinées (déchet de briques) se distinguent par une vitesse de réaction plus rapide et par une réactivité plus élevée avec l'hydroxyde de calcium libéré par l'hydratation du ciment portland [20,26]. Les composés ainsi formés, par exemple, les C-S-H et les hydrates aluminosilicates [17,24] ont pour effet de diminuer la porosité des mortiers et des bétons, ce qui favorise la durabilité des ouvrages. La consommation de l'hydroxyde de calcium par le déchet de briques permet également de supprimer le phénomène des efflorescences. Dans un premier temps on a choisi de rappeler la définition et les méthodes de mesure de l'activité pouzzolanique parmi celle-ci :

- Déterminations chimiques (L'indice d'activité capelle).
- Méthodes physiques (taux vitrification des minéraux).
- Essaie mécaniques et analyses chimiques.

I.7. Conclusion :

La disponibilité et le coût du béton en fait le matériau de prédilection pour répondre à la forte croissance des pays en développement. Mais comment éviter que cette dernière alourdisse son bilan écologique.

On s'intéresse dans ce travail par l'utilisation de ressources locales, les argiles, comme substituant au ciment.

Référence :

- [1] Nacéri A., Hamina M C., «Use of waste brick as a partial replacement of cement in mortar», *Waste Management*, vol 29, 2009, p. 2378–2384.
- [2] Dong O., Weitting X., TOMMY Y L., JANET F C S., «Increasing mortar strength with the use of activated kaolin by-products from paper industry», *Construction and Building Materials*, vol 25, 2011, p. 1537–1545.
- [3] Rackel S N., *Approche performantielle des bétons avec Métakaolins obtenus par calcination flash*. Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2011.
- [4] Changling H., Bjare O., Emil M., «Pozzolanic reactions of six principal clay minerals: activation, reactivity assessments and technological effects», *Cement and concrete research*, vol 25, 1995, p. 1691-1702.
- [5] Taylor, H. F. (1997). *Cement chemistry*: Thomas Telford.
- [6] Taylor, H. (1964). *The Chemistry of Cements, Vol. I*: Academic Press, London.
- [7] Escalante-García & Sharp 1998) :Escalante-García, J. I. & Sharp, J. H. (1998). *Effect of temperature on the hydration of the main clinker phases in portland cements: part in cements*. *Cement and Concrete Research*, 28 (9): 1245-1257.
- [8] G. DREUX, «Nouveau guide du béton», Edition Eyrolles, 2^{ème} édition, 1979, P17.
- [9] M.BELOUADAH, « Evaluation des effets secondaires liés à l'incorporation des adjuvants sur les propriétés de durabilité du béton à base de matériaux locaux », Thèse de magister, M'sila, 2004, P84,98.
- [10] R. DUPAIN, « Granulats, sols, ciments et bétons », 2^{ème} édition, Janvier 2000, Edition Casteilla, P 80-81.
- [11] C. KIRPACH, *Ciments Luxembourgeois, Séminaire- Béton 2001: Journée d'information technique*, 23 novembre 2001, P 7-21
- [12] Guy, Roland et Claude, 1978 : Guy, A., P. Roland et G. Claude. 1978. *Précis de minéralogie*. Paris, Masson, 335 p.
- [13] Bouras Omar, 2003. *Propriétés adsorbantes d'argiles pontées organophiles: synthèse et caractérisation*. Thèse de doctorat de l'université de Limoges

- [14] S. Caillère, S. Hénin et M. Rautureau, 1982. *Minéralogie des argiles: Classification et Nomenclature*; Editions Masson; Paris.
- [15] SIMONE CAILLERE . *Minéralogie des argiles* P355.
- [16] JEAN-PIERRE MAGNAN .*Mécanique des sols et des roches*.2000. vol 1
- [17] Chakchouk A., Samet B., Mnif T., «Study on the potential use of Tunisian clays as pozzolanic material», *Applied Clay Science*, vol 33, 2006, p. 79–88.
- [18] Pagliari L., Dapiaggi M., Pavese A., Francescon F., «A kinetic study of the quartz– cristobalite phase transition», *Journal of the European Ceramic Society*, vol 33, 2013, p. 3403–3410.
- [19] BRINDLEY G.W, NAKAHIRA M. *the kaolinite – mullite réaction series : I survey of outstanding problems .II the high temperature phase. journal of American ceramic society*.1959, vol.42 ;p311-324.
- [20] HORVATH I ,KRANZ G.A. *thermoanalytical study of high temperature dehydration of kaolinites with various structural arrangements .silikaty*, 1980,vol24.p149-156 .
- [21] GNIEWEK J. *réactivité de la montmorillonite calcinée .utilisation dans le génie civil. thèse .lyon : INSA de Lyon, 1987,184p.*
- [22] BICH.CHRISTEL, *contribution à l'étude l'activation thermique du kaolin : évolution de la structure cristallographique et activité pouzzolanique. thèse, MEGA de Lyon, 2005,p559.*
- [23] BARRON J. SAUTEREY R. *Le béton hydraulique .Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées paris.p559*
- [24] A KOMAR. *Matériaux et éléments de construction, Editions Mir Moscou 1976, p540.*
- [25] MESSI. A. *propriétés du ciment pouzzolaniques élaborées à partir de latérites actives.*
- [26] KakalIG , PERRAKIT , TSIVILLIS, et al. *Thermal treatment of kaolin : the effect of mineralogy on the pozzolanic activity. Applied Clay Science*, 2001,p73-80.
- [27] : AMBROISE J . *Elaboration de liants pouzzolanique à moyenne température et études de leurs de propriétés physico-chimique et mécanique. Thèse .Lyon : INSA de Lyon, 1984,165p.*

CHAPITRE II :

LA BENTONITE

II.1. Introduction :

La bentonite est une argile colloïdale naturelle découverte aux Etats Unis en 1888 à Fort Benton dans le Wyoming. L'expression bentonite a été introduite pour la première fois par le géologue américain KHIGHT [1]. La bentonite a la propriété de gonfler au contact de l'eau en donnant un gel plus ou moins épais. De très nombreux gisements ont été découverts dans le monde [2]. Le nom de bentonite désigne généralement une poudre minérale constituée essentiellement de l'argile de montmorillonite (famille des smectites). Dans leur état naturel, la plupart des gisements de bentonite sont hétérogènes ; ils sont constitués de smectites mélangées ou inter stratifiées avec l'illite et/ou la kaolinite et d'autres impuretés [3]. Selon leur origine, la bentonite présente des propriétés différentes; Sur le plan minéralogique la bentonite est un silicate d'alumine hydraté du groupe des Montmorillonites et qui regroupe trois types d'argile:

- **Les bentonites sodiques naturelles** (gonflantes et actives naturellement).
- **Les bentonites calciques naturelles** (peu gonflantes, peu actives mais donnant très peu de lies lors de leur utilisation dans les vins).
- **Les bentonites activées** gonflement et activité définis par le taux d'activation).
Le volume de lie formée dans le vin est directement proportionnel au taux d'activation.

II.2. Origines de la bentonite :

L'altération et la transformation hydrothermale de cendres des tufs volcaniques riche en verre entraînent la néoformation des minéraux argileux [4] qui font partie principalement du groupe des smictites. Les roches argileuses ainsi formées portent le nom de bentonite, d'après le gisement situé près de Fort Benton (Wyoming- Etats unis). Elle contient plus de 75 % de montmorillonite [4]. Cette dernière fut découverte pour la première fois en 1847 près de Montmorillon, dans le département de la Vienne (France). Les bentonites se caractérisent par une capacité élevée d'adsorption d'échange ionique et de gonflement, ainsi que par des propriétés rhéologiques. Elles ont de ce fait de larges applications, toujours plus nombreuses et dans différents domaines [5]. En Algérie, Les bentonites sont fréquentes dans le sous-sol. Certaines proviennent des cendres volcaniques comme celles de la vallée de la rivière du Chélif, alors que d'autres ont été formées par l'altération des roches rhyolites.

II.3. Structures de la bentonite :

La montmorillonite (Figure2) est le constituant principal de la bentonite [6]. La montmorillonite provient de la transformation naturelle des cendres volcanique dans l'altération s'est produit il y a des milliers d'années par lessivage alcalin ou acide [7]. Elle fut découverte pour la première fois en 1847 dans la montagne de Montmorillon dans la Vienne (France) (Damour, 1847). La montmorillonite c'est un phyllosilicates 2:1 (famille de smectites) dans lequel la charge négative de la couche est électriquement équilibrée par une charge égale, des cations échangeables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , H^+ , K^+ , NH et Na^+) situés principalement entre ces couches silicates; ces cations ne font pas partie de la structure et garde une certaine mobilité[6].

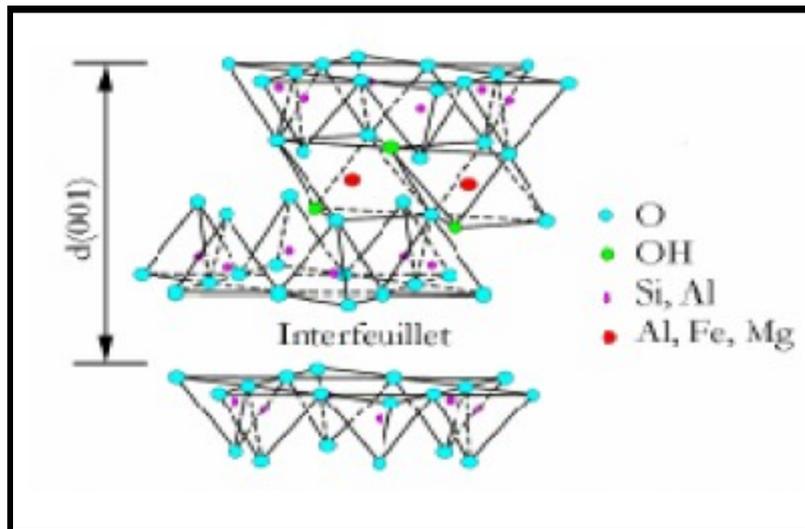


Figure II.1. Structure idéale de la montmorillonite et de la beidellite (LUCKHAM et ROSSI, 1999).

II.4. Types de bentonite :

On distingue trois types de bentonites par rapport à leur pouvoir de rétention de molécules organiques, qui sont :

- Bentonite sodique naturelle.
- Bentonite calcique naturelle.
- Bentonite activée.

II.5. Bentonite naturelle :

En fonction de la nature du cation échangeable présent, il existe à l'état naturel deux types de bentonites :

Les bentonites sodiques, où le sodium est le cation échangeable majoritaire, elles ont un fort pouvoir de gonflement et d'adsorption.

Les bentonites calciques, où le calcium est le cation échangeable majoritaire, elles ont un pouvoir de gonflement et d'adsorption plus faible que les bentonites sodiques.

Ces deux types de bentonites, éventuellement après un séchage à 80-90 °C, sont simplement broyés avant leur commercialisation [8].

II.6. Bentonites activées :

Afin d'améliorer les propriétés d'adsorption des bentonites calciques, ces dernières sont le plus souvent activées par du carbonate de sodium puis séchées et broyées ; On obtient ainsi des bentonites calciques activées dont les propriétés sont égales ou supérieures à celles des bentonites sodiques. Les propriétés de ces bentonites ainsi activées ou permutées sont moins stables dans le temps (3 à 18 mois) et dépendent de l'activation et des taux de magnésium, calcium et sodium. Ces différents types de bentonites se présentent sous forme de poudre ou de granulés sphériques ou cylindriques. Elles ont des couleurs très variables allant du blanc pour les produits les plus purs au gris, beige ouvert pour les autres [8].

II.7. Fonction de bentonite :

- ⊙ Fluide de forage biodégradable.
- ⊙ Performant dans toutes les conditions de sol (un seul fluide de forage).
- ⊙ Viscosité élevée pour un nettoyage efficace du trou.
- ⊙ Rentabilité et résistance au gel élevé pour une suspension optimale des débris et leur transport.
- ⊙ Procure une stabilité exceptionnelle au trou de sonde dans des formations non consolidées.
- ⊙ Procure une inhibition de l'argile et du schiste.
- ⊙ évite une agglomération fragmentaire. ⊙ Limite le couple de torsion (mouvement de rotation). ⊙ Réduit le risque de dommages.
- ⊙ Maximise le rendement des puits d'extraction (exemple : puits à eau).
- ⊙ Produit un fluide de forage à faible teneur en boue/corps solides, augmentant ainsi le taux de pénétration (aucune impureté) [9].

II.8. Avantage de bentonite :

- ⊙ Non toxique.
- ⊙ Dilution rapide et efficace dans de l'eau claire et saline.
- ⊙ Stable durant le forage.
- ⊙ Recyclable.
- ⊙ Naturellement biodégradable (un stabilisateur peut être rajouté pour retarder la biodégradation).
- ⊙ Peut être détruit chimiquement avec de l'Hypochlorite de calcium.

Faible coût de mise au rebut. Détruit ou dégrade naturellement le polymère CB-500 pour épandre les déblais de forage dans une cuve de décantation. La phase fluide peut ensuite être traitée dans une station d'épuration d'eaux d'égouts, laissant des déblais à demi secs [9].

II.9. Propriétés de bentonite :

II.9.1. Propriétés de gonflement :

L'une des propriétés les plus remarquables de la bentonite est sa faculté de gonfler considérablement dans l'eau pour former des masses visqueuses et gélatineuses. Pour qu'une Argile soit vraiment une bentonite au sens commercial du terme, elle doit gonfler au moins cinq fois l'équivalent de son volume au contact de l'eau. Il est admis que le gonflement des Montmorillonites est principalement dû au fait que l'absorption de l'eau par la structure de la Molécule s'effectue entre les feuillets et écarte les uns des autres.

L'adsorption de l'eau est une réaction exothermique qui implique la formation de liaisons D'hydrogène entre les molécules d'eau et les groupements hydroxyles de la montmorillonite et l'hydratation des cations échangeables [10]. Le gonflement de la montmorillonite est un processus réversible. Autrement dit, la montmorillonite peut être séchée et gonflée à nouveau autant de fois que l'on voudra sans que ses

propriétés soient modifiées, pourvu que l'eau utilisée soit pure et que le séchage n'a pas été fait à une température élevée [11].

II.9.2. Etat colloïdal :

La stabilité de l'état colloïdal de la bentonite est due, tout d'abord, à la taille de ses particules (environ 2 μm .) et aussi à sa charge négative. En effet, ces particules de bentonite sont dotées de charges négatives importantes. En conséquence, elles se repoussent les unes des autres lorsque elles flottent dans l'eau et elles demeurent en mouvement constant, qui s'appelle mouvement Brownien. Elles s'entourent d'un certain nombre d'ions de charges opposées et se disposent régulièrement dans l'espace en formant une double couche de matière à maintenir l'électro-neutralité du système [12].

II.9.3. Capacité d'échange cationique :

La capacité d'échange est la somme du nombre d'ions absorbés entre les feuillets de la structure de l'argile et de ceux adsorbés sur la surface externe [13]. Cette capacité se trouve typiquement dans un intervalle de 70 à 160 meq/100 g. Elle permet, étant donné la grande surface de la montmorillonite, de fixer très efficacement les cations des métaux lourds, des cations organiques et quelques hydrocarbures.

II.10. Capacité de gonflement et d'adsorption d'eau :

Généralement, toutes les argiles possèdent une capacité de rétention des molécules d'eau plus au moins importantes. Mais seulement quelques-uns sont capables d'incorporer des quantités appréciables de molécules d'eau dans leur espace interfoliaire. Les smectites, les vermiculites et les minéraux interstatifiés sont parmi les argiles qui se caractérisent par une forte capacité d'adsorption d'eau entre les feuillets de leur structure ce qui provoque une variation de leurs volumes et provoque ainsi leur gonflement. Il est à préciser que le gonflement des argiles est

tributaire aussi de sa composition puisque ces matériaux sont constitués par des minéraux argileux et d'autres minéraux associés. La texture des argiles joue aussi un rôle primordial dans ce processus d'expansion. Pour les argiles naturelles, cette propriété est liée aussi au site d'échantillonnage ce qui génère une spécificité pour chaque type d'argile selon sa genèse et son milieu de formation.

Les minéraux gonflants ont une structure de base à 10 Å. Cette distance est variable selon l'état d'hydratation. Ainsi, elle est d'environ 12,5 Å pour l'incorporation d'une couche d'eau au tour du cation interfoliaire et de 15 Å pour deux couches. Cette hydratation conduit à une augmentation du volume pouvant atteindre les 95 %. Par ailleurs, il y a des minéraux argileux contenant de l'eau adsorbée mais qui n'ont pas pour autant de propriétés de gonflement, il s'agit des argiles fibreuses.

II.11. Les domaines d'utilisation de la bentonite :

La bentonite est largement utilisée dans de nombreux secteurs industriels, Elle possède d'excellentes propriétés adsorbants, souvent utilisée en catalyse dans l'industrie du pétrole [14]. A l'état brut, sa plus importante application, après cuisson au dessus de 1000 °C, est la production de céramiques (porcelaine, faïence...etc). A l'état modifié, l'argile est utilisée dans l'industrie du papier, des produits cosmétiques, dans l'industrie pharmaceutique (fabrication des médicaments, tels: Smecta et Bedelix)[15,16].

Elle est utilisée pour la réalisation de barrières étanches pour les déchets industriels et ménage (géo membranes bentonitiques) et les déchets radio actifs (barrières ouvragées; poudres compactées) [17]. Pour la stabilité des forages de fait, de ses propriétés rhéologiques [18] ainsi que le confinement des métaux lourds dans le traitement de seaux contaminés par ces dernières [19]. A un degré moindre, la bentonite est utilisée dans de nombreux autres processus industriels tels que la fabrication des peintures, l'aménagement des routes en travaux publics [20].

En agriculture, la bentonite contribue à l'augmentation de la teneur en azote

assimilable dans le sol, la bentonite améliore aussi les paramètres chimiques des sols sableux, l'application de la bentonite augmente la production agricole, l'économie de l'eau et les éléments fertilisants [21].

II.12. Conclusion :

La bentonite est une argile noble du fait de sa rareté et de sa convoitise par les industries. Les propriétés physico- chimiques (gonflement, plasticité, échange d'ions...etc.) de la bentonite lui ont valu sa noblesse et sa convoitise. Les domaines d'utilisation de la bentonite sont variées, stratégiques et sensibles donc il faut toujours assurée la qualité et la quantité suffisante du produit.

Les argiles bentonitiques des gisements en Algérie sont de très bonne qualité et peuvent être utilisées comme boues de forage, Terres décolorantes, Bentonite de fonderie, Bentonite de charge, et bentonite pour Bouletage de fer.

REFERENCES :

- [1] (SIGG., 1999).Sigg J., 1991- Les produits de terre cuite. Editions Septima, Paris, France. Sigg J., 1991- Les produits de terre cuite. Editions Septima, Paris, France.
- [2] POINSAUTetal.;1995).Poinsaut P. Hardy G. (Mv/Soec). Les bentonites : Caractérisation-Analyse et Comportement –Utilisation des bentonites en oenologie. Revue des oenologues n°75 (Avril1995) n°76 (Juin 1995) N°77 (Septembre 1995).
- [3] (LARIBI et al.2005 Laribi, S., J.-M. Fleureau, J.-L. Grossiord and N. Kbir-Ariguib, "Comparative yield stress determination for pure and interstratified smectite clays" Rheol. Acta 44, 262-269 (2005).
- [4] Besq. A « Ecoulements laminaires de suspensions de bentonite industrielles. Caractérisation rhéométrique- Ecoulements en conduites axisymétriques- Applications aux activités de génie civil » Thèse de doctorat (2000) de l'université de poitiers.
- [5] Ferhat.M « Co-Adsorption des métaux lourds sur la bentonite modifiée en présence de flocculants minéral et biologique » thèse de magister université Mouloud Mammeri-Tizi-ouzou (2012) P18.24.
- [6] BOUAZZA F., 2012 - Elimination des polluants organiques par des argiles naturelles et modifiées, mémoire de magistère, université Abou Bekr Belkaid Tlemcen,pp 9-11.
- [7] THOMASSIN H.; DIDIER G.; PROUST D.; PANTET A.; FONTAINEC.; DAUGER N.; LAFOERST., 2008 - Rencontre Universitaire de Génie Civil. Nancy.
- [8] BOUGDAH N., 2007 - Etude de l'adsorption de micropolluants organique sur la bentonite, mémoire de magisters Université 20 Août 55, Skikda,pp30-32.
- [9] MEMOIRE MASTER II, UNIVERSITEDES SCIENCES EXACTES ET DE L'INFORMATIQUE. Thème « Effet de la température sur la qualité de la bentonite et

caractérisation physico-chimique par FTIR au niveau de la société BENTAL - unité de Mostaganem.

[10] EI-Batouti, M., O. Ivi. Sadek et F. F. Assaad. 2003. «Kinetics and Thermodynamics Studies of Copper Exchange on Na-montmorillonite Clay Mineral». *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 259, p. 223-227

[11] (Dérivé et Esme, 1951) : Dérivé, M, et A. Esme. 1951. *La bentonite*, Paris, Dunod, 224 p.

[12] (Sandra García , 2006) : Sandra García-García, Mats Jonsson, Susanna Wold, 2006. Temperature effect on the stability of bentonite colloids in water. *Journal of Colloid and Interface Science* 298, 694–705.

[13] : Klug et Alexander, 1967) : Klug, H. P. et L. E. Alexander. 1967. «X-ray diffraction procedures for polycrystalline and amorphous materials». New York, J. Wiley, 716 p.

[14] : SWARNAKER R.; BRANDTAND; KYDD A., 1996 – *Applied Catalysis A* :General 142 61-71

[15] : JULIA BERGER., 2008- Thèse de Doctorat, de l'Université Louis Pasteur de Strasbourg, et Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre .Thème : «Hydratation des argiles gonflantes et influence des bactéries. Etude expérimentale de réaction in situ».

[16] JULIEN LAURENT., 2009 ,de l'Université ENSIL Limoges. Thème : «Modifications de la répartition d'espèces métalliques (Cd,Cu) induites par des prétraitements physique (ultrasons), chimique (ozone) et thermique au sein des procédés à boues activées».

[17] : JOZJA N., 2003 - « Etude de matériaux argileux Albanais. Caractérisation multi-échelle d'une bentonite magnésienne. Impact de l'interaction avec le nitrate de plomb sur la perméabilité ».Thèse de doctorat de l'Université d'Orléans.

[18]:BESQA.,2000-« Ecoulement laminaires de suspensions de bentonite industrielles. Caractérisation rhéométriques- Ecoulements en conduites axi symétriques. Application aux activités du Génie Civil ». Thèse de doctorat de l'Université de Poitiers

[19]:HAJJAJI M. et EL ARFAOUI H., 2009 - «Adsorption of méthylène blue and zinc ions on raw and acid-activated bentonite from Morocco ». *Applied Clay Science* 46, 418-421.

[20]:KUN SU., 2005 - Mémoire d'Habilitation, de l'Université des Sciences et Technologies de Lille (USTL) .Thème: «Contribution à l'étude du comportement mécanique et thermo-hydro-mécanique des argilites du Callovo-Oxfordien».

[21]:HALILAT M.T. et TESSIER D., 2006 - Amélioration de la rétention en eau de matériaux sableux par l'ajout de bentonite. *Cahiers Agricultures*, Vol. n°4,347-353.

CHAPITRE III : MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES

III.1. Introduction :

Dans ce chapitre présent, nous présentons tout d'abord les différents matériaux utilisés, ainsi que le protocole utilisé pour la préparation de la bentonite, En deuxième lieu nous décrirons les protocoles expérimentaux utilisés pour la préparation de la pâte (confectionnés les échantillons) et les différents essais réalisés au cours de notre étude.

III.2. Caractérisation des matériaux utilisés :

Les caractéristiques physico-chimiques des matières premières utilisées pour la confection des pates sont présentées ci-après

III.2.1. Ciment :

Nous avons choisi dans cette thèse le ciment spécialement utilisé " ciment portland CPA CEM I/42.5", dans la réalisation des structures en béton armé, cette Ciment provenant de la cimenterie de LAFARJ qu'il répond à la norme Algérienne NA 442 (NA 442, 2013) et à la norme Européenne EN 197-1 avec un taux en $C_3A < 3\%$. (cf. [fiche technique Annexe A](#)).



Figure III.1 - Sac de ciment CEM I / A 42,5.

III.2.2. Bentonite :

L'argile de bentonite a été fournie par ENOF Ltd. de la région de Maghnia, wilaya de Tlemcen, Algérie. L'argile a été reçue sèche et pulvérisée dans des sacs de 50 Kg qui étaient destinés à être utilisés comme fluide de forage. Les propriétés de l'argile ont été dans (cf. [fiche technique Annexe A](#)).

III.2.2.1. Préparation de la bentonite :

Nous avons utilisé deux types de bentonite : la première bentonite broyée mécaniquement et la deuxième de bentonite calcinée à 750 °C. La bentonite a été préparée selon les étapes suivantes :

a) Bentonite broyée mécaniquement :

Sécher la bentonite à 110 °C pendant 24 h en suit :



Figure III.2 - Bentonite après le séchage.

La bentonite a subi un processus de broyage mécanique à l'aide d'un appareil appelé micro-Deval (Figure III.3).



Figure III.3 - Appareil Micro-Deval.

La méthode de préparation suit les étapes suivantes :

On a pesé 500 grammes de bentonite et 5000 grammes de boulets sphériques en acier inoxydable (Figure III.4).



Figure III.4 - la bentonite et les boulets sphériques.

Mettre la bentonite et les boulets sphériques dans un cylindre creux (De un à quatre cylindres creux, chaque cylindre est utilisé pour effectuer l'essai).



Figure III.5 - les boulets à mélanger avec la bentonite dans les cylindres creux.

Remplacer le couvercle et serrer les boulons de fixation. S'assurer que les cylindres sont étanches pendant leur rotation.

- Mise en place les quatre cylindres dans la machine.
- Mise en route de l'essai en faisant effectuer à la machine 12.000 rotations à une vitesse régulière en deux heures et demie.



Figure III.6 - Time-tronic.

Un dispositif qui permet au moteur de s'arrêter automatiquement à la fin de l'essai.

Nous mettons la bentonite dans un tamis et la tamisons pour la séparer des boulets.



Figure III.7 - la bentonite après un broyage mécanique.

b) Calcination thermique :

La calcination de la bentonite se fait dans un four à moufle (Figure III.8).



Figure III.8 - Four à moufle.

Dans cette partie, nous avons calcinée la bentonite qui a été broyée mécaniquement dans une température de 750°C avec une vitesse de 5°C par minute (environ deux heures et demie).

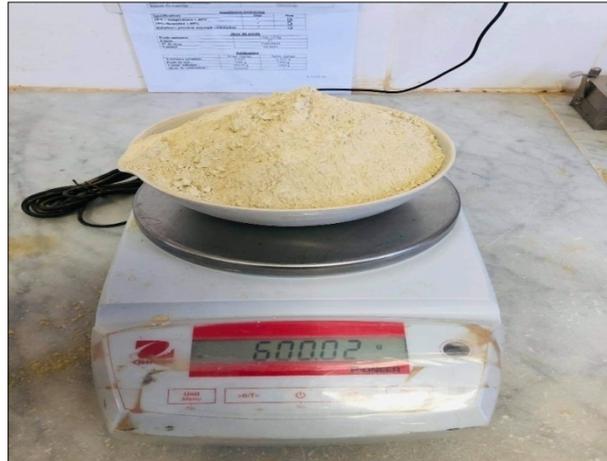


Figure III.9 - Bentonite broyée.

Pour éviter le choc thermique les échantillons a été récupéré après 24h (stabilité de température ambiante).



Figure III.10 - Bentonite calcinée.

III.3. Méthode de formulation de la pate cimentaire :

Les pâtes ont été mélangées avec deux types de bentonite différents pourcentages massique de 5%, 10%, 15%, 20%, 50 % dans des moules cylindriques en plastique PVC d'une taille de 36x40mm avec un rapport constant de $E/L_{qui}=0,5$. Et les moules ont été démontés après une journée. Ensuite, les échantillons ont été placés dans une chambre de durcissement à 20 °C pendant 30 jours.



Figure III.11 - Ciment avec le substitut de la bentonite.



Figure - 12 : Eprouvettes pate de ciment.

III.4. Méthodes expérimentales :

III.4.1. Variation de la masse :

On mesure la masse à partir des essais au laboratoire, Le principe de cet essai est de mesurer la masse de trois échantillons de chaque gâchée. Les 3 échantillons (1, 2,3) pesées sur une seule et même balance avec une précision de 0.01 g.



Figure III.13 - Balance de 0.01 g.

III.4.2. Essai de compression :

Les essais de compression simple ont été réalisés au laboratoire LTPS sur une presse, elle est programmée pour les essais de compression (éprouvette), trois échantillons pour chaque formulation à 7, 14, 30 jours. Nous avons placé l'échantillon confectionné entre les deux plateaux de la presse, le plateau inférieur est posé étant fixe, le plateau supérieur est mobile. En dévalant celui-ci écrase le corps de l'échantillon contre le plateau inférieur. L'effort est appliqué progressivement à vitesse de chargement constante.

L'essai de compression est ainsi achevé, la charge maximale est donnée dès que la rupture est enclenchée, cette charge maximale servira à déterminer la résistance qui s'obtient (Figure III.14).



Figure III.14 - Dispositif de résistance à la compression.

III.4.3. Absorption capillaire :

Les mesures de capillarité sont réalisées selon les prescriptions de la norme AFPC-AFREM sur éprouvettes de dimensions 36x40 mm. Les échantillons sont d'abord séchés à l'étuve à la température de 55 °C jusqu'à la stabilisation de la masse, puis laissés à l'air libre et pesés à l'aide d'une balance de précision 0.01 g, afin de déterminer leur poids à l'état sec M_0 . Les échantillons sont ensuite placés sur un lit de gravier dans des récipients en plastique peu profonds, contenant de l'eau. La profondeur d'immersion des surfaces d'échantillon pendant le test d'absorption est de 2 à 3 mm. Après chaque échéance de submersion, les échantillons sont prélevés de l'eau, essuyés et séchés superficiellement à l'aide d'un papier absorbant pour enlever l'excès d'eau présente sur la surface puis pesés (M_t). Les mesures de masse et pénétration d'eau sont prises à des intervalles : 5, 10, 15, 30, 45, 60, 90, min et 24 heures. Le coefficient d'absorption capillaire est défini par la relation suivante :

$$C = \frac{M_t - M_0}{A}$$

C : Coefficient d'absorption capillaire (kg/m^2),

M_t : Masse de l'éprouvette à l'instant t (kg),

M_0 : Masse initiale de l'éprouvette (kg),

A : Section immergée de l'éprouvette (m²),

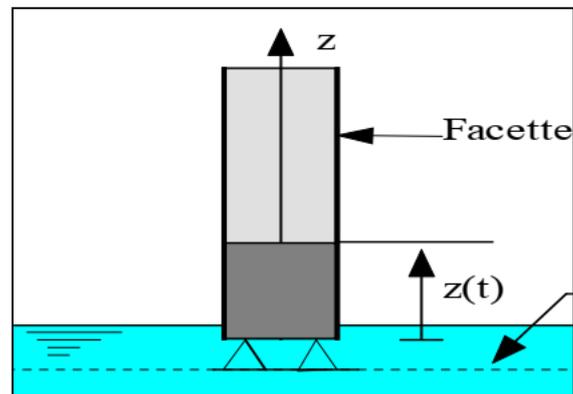


Figure III.15 - Dispositif expérimental de l'essai d'absorption capillaire.

III.4.4. Porosité accessible à l'eau :

La porosité accessible à l'eau a été mesurée selon la recommandation de l'AFPC AFREM. Cette porosité a été estimée en faisant la moyenne de trois valeurs. Les échantillons ont d'abord été séchés dans une étuve à 55 °C, jusqu'à stabilisation de la masse (M_d), puis l'air présent dans les pores de mortier a été évacué à l'aide d'une pompe à vide. La masse des cubes de mortier entièrement saturés a été mesurée sous l'eau (M_{sw}) et dans l'air (M_{sa}). La porosité totale (P) a été calculée en utilisant l'équation :

$$P = (M_{sa} - M_d) \times 100 / (M_{sa} - M_{sw})$$

Ou :

M_{sa} est la masse saturée d'eau dans l'air,

M_d est la masse sèche et M_{sw} est la masse saturée d'eau sous l'eau.



Figure III.16 - Dispositif de mesure de la porosité accessible à l'eau.

III.5. Conclusion :

Dans ce troisième chapitre, nous avons présenté les matériaux et les méthodes expérimentales utilisées dans cette étude. Par ailleurs, nous avons détaillé les différentes méthodes de préparation appliquées à la bentonite.

Nous avons également montré les protocoles d'essais utilisés dans cette recherche pour la détermination des propriétés physiques (masse volumique, porosité, absorption d'eau), mécaniques (résistance à la compression) de composites cimentaires substitué avec différents pourcentage de bentonite.

CHAPITRE 4 : RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATIONS

IV.1. INTRODUCTION :

Dans ce chapitre qui constitue en fait une des parties essentielles du mémoire nous présentons l'ensemble des résultats obtenus par des mesures effectuées sur les divers échantillons élaborés (Masse volumique, Absorption, la porosité, les résistances mécaniques).

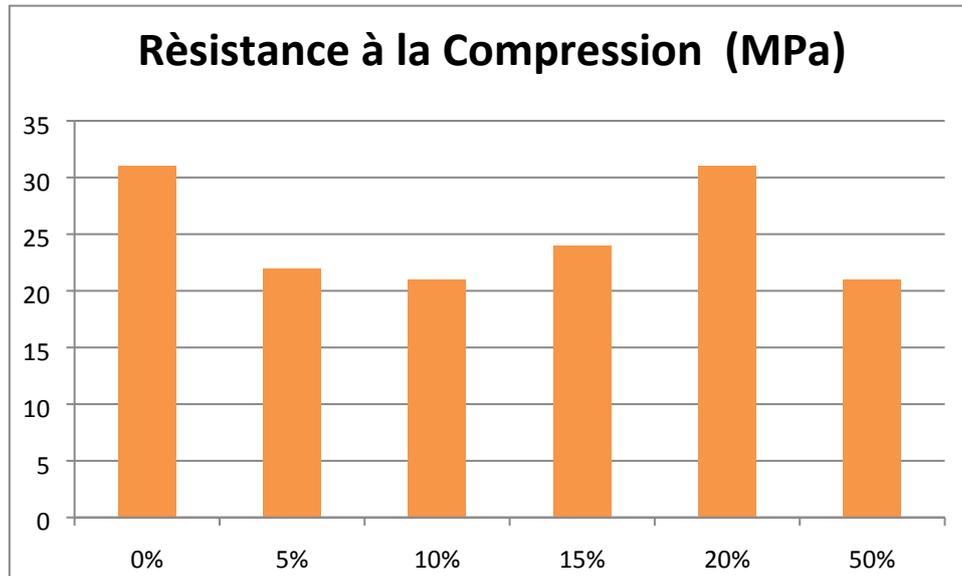
VI.2. La Masse volumique:

La masse volumique des différentes pâtes de ciment.

Tableau IV.1 – masse volumique

	(Kg/m ³)
0%	1882.835
5%	1862.449
10%	1933.676
15%	1867.362
20%	1950.868
50%	1756.101

IV.3. RESISTANCE A LA COMPRESSION :



Figures IV.1- Résistance à la compression à 30 jours.

Les différents résultats de la résistance à la compression sont représentés la Figure IV.1. L'analyse des résultats permet d'apporter les commentaires suivants :

Le mélange de témoin avait la résistance la plus élevée pour chaque intervalle de test. On peut voir que plus la teneur en argile bentonite n'était élevée, plus l'échantillon n'avait une résistance inférieure par rapport au mélange témoin. Par exemple, les mélanges d'argile bentonite à 20% avaient une résistance à la compression plus élevée que les mélanges d'argile bentonite à 50%. On peut également démontrer que dans la plupart des cas, la résistance augmentait également avec le temps; cependant, le taux d'augmentation diminuait avec le temps.

VI.4. PROPRIETES PHYSIQUES :

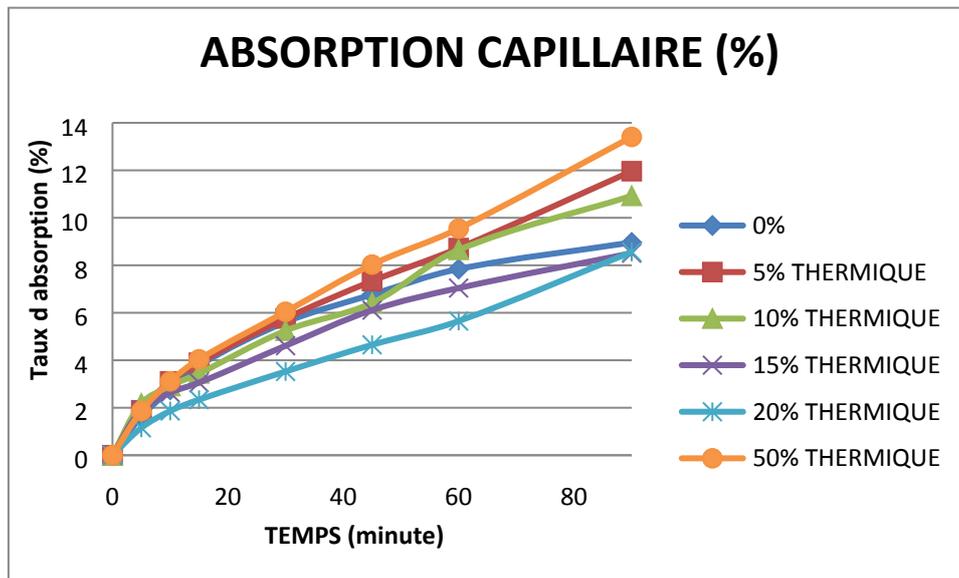


Figure IV.2 - Absorption capillaire à 90 minutes.

Nous avons réalisé des tests de remontée capillaire des pates de ciment après la cure de 30 jours dans la chambre.

Les résultats obtenus après 1 h et 30 min de test d'absorption capillaire, sont présentés sous forme de courbes sur la figure IV.2. On peut voir que la quantité d'eau absorbée par toutes les compositions testées augmente progressivement dans le temps.

La quantité d'eau absorbée dans le cas des échantillons mélangé avec 50% d'argile calciné est plus importante que dans l'autre type des éprouvettes. En outre, les éprouvettes 0 % signalent moins quantité d'eau absorbé par rapport les autres.

Il est à noter que le coefficient d'absorption capillaire donne une idée de la porosité capillaire des bétons: lorsque la porosité capillaire augmente, le coefficient d'absorption augmente.

VI.5. Porosité accessible a l'eau :

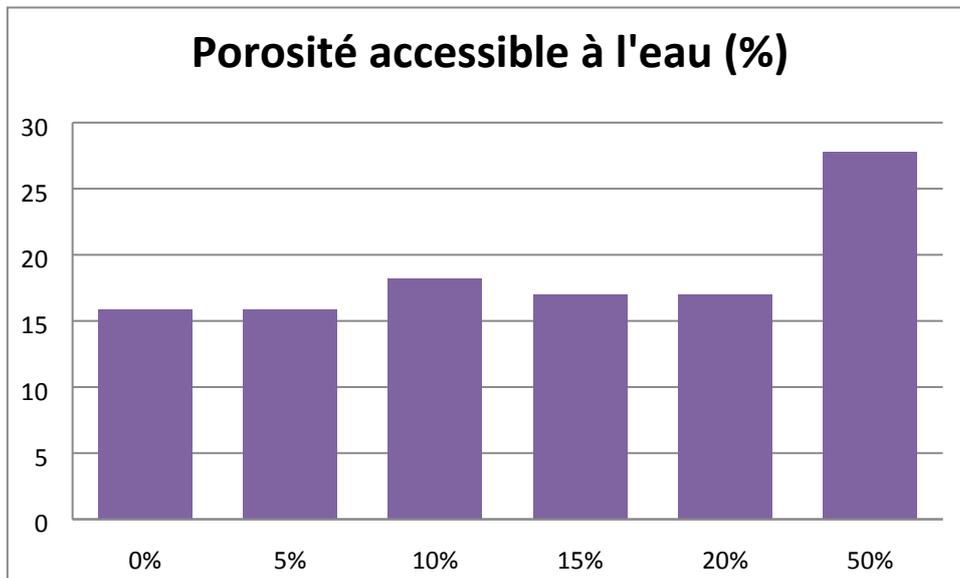


Figure VI.3 – Porosité accessible à l'eau.

La porosité accessible à l'eau pour les pates avec différent pourcentage 5, 10, 15, 20, 50% de la bentonite calcinée après la cure d'un (1) mois. Les résultats sont présentés dans la Figure III.11

Les échantillons de 50 %, présentent une augmentation dans la porosité par rapport les autres échantillons plus de 25%. Cependant, les pates de référence de 0% ils ont enregistré 16% de porosité, Nous avons remarqué que la plus part des résultats de porosité entre 15 et 20 %.

IV.6. CONCLUSION

Cette étude vise à apporter une contribution à la valorisation de la bentonite de Maghnia , Wilaya de Tlemcen après calcination en substitution partielle au ciment en tant que pouzzolane artificielle. L'influence de cet ajout sur les pates a été étudiée. Il a subi une calcination pour le rendre actif puis incorporé en dosages définis substituables au ciment (0, 5, 10, 15, 20 et 50 % de bentonite calcinée par rapport au dosage en masse du ciment). Des pates ont également été formulées avec différents pourcentages de substitution de bentonite calcinée (0, 5, 10, 20, 25 et 50 %). Les résistances mécaniques à la compression se sont avérées satisfaisantes pour les pates à 10 % et 25% d'ajout de bentonite calcinée.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Dans l'étude présentée, la bentonite considérée de L'Algérie s'est avérée être une pouzzolane réactive et utile lorsqu'elle a été traitée thermiquement à des températures d'environ 750°C. Les bonnes propriétés de l'argile dite calcinée dans le ciment sont devenues apparentes dans une assez bonne maniabilité et des contributions de résistance élevée au-delà de sept jours d'âge.

Actuellement, les matériaux cimentaires complémentaires (SCM) les plus utilisés. Par rapport aux argiles activées illitiques et kaolinitiques, le matériau étudié a pris une position intermédiaire. Comme elle était basée sur la montmorillonite, l'activité pouzzolanique mesurée pourrait être attribuée à une combinaison à la fois d'une teneur élevée en phase amorphe étant le produit métastable de la décomposition des minéraux argileux et d'une surface spécifique élevée par rapport aux SCM courants. En plus du développement de la résistance, sa contribution à l'hydratation du ciment a pu être observée dans les changements de porosité du la pate durci.

On peut affirmer que des argiles similaires à la bentonite étudiée ici peuvent être activées de telle manière qu'elles sont capables de remplacer de grandes quantités de ciment Portland dans la partie liante du béton sans altérer ses propriétés les plus significatives. Par conséquent, ces matériaux peuvent être utilisés pour réduire l'impact environnemental du ciment et du béton, y compris en premier lieu l'empreinte CO₂.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Il a été montré que les propriétés mécaniques pouvaient être maintenues et même augmentées à partir de 30 jours en substituant 20% du ciment.

La température de calcination de la bentonite a une forte influence sur la résistance à la compression. Cela a renforcé l'importance de comprendre la minéralogie et le comportement thermique des argiles mixtes pour définir leurs températures de calcination optimales.

L'activité pouzzolanique de l'argile cubaine calcinée à 750°C a le plus contribué à la résistance à la compression des mortiers.

Les résultats du test de sorptivité ont indiqué que les propriétés de durabilité du ciment a été partiellement remplacé par des argiles calcinées réactives pourraient être améliorées.

La faible résistance à la compression à un jour pour les systèmes mixtes est probablement l'inconvénient majeur de l'utilisation de ces adjuvants minéraux d'un point de vue technique et des efforts devraient être investis pour améliorer les propriétés au jeune âge. Néanmoins, compte tenu des applications de logement à faible coût telles que les blocs de béton creux, une faible résistance précoce peut ne pas être un problème.

ANNEXE A



50kg

Mokaouem Plus
مقاوم بلاس

ALGÉRIE



Ciment Portland

NA 442 - CEM I 42,5 N-SR 3

Mokaouem est un ciment gris résistant aux sulfates, résultat de la mouture d'un clinker contenant un faible taux d'aluminate de calcium avec une proportion de gypse inférieure à celle d'un ciment portland composé.

Mokaouem
NA 442 - CEM I 42,5 N-SR3

Mokaouem NA 442 - CEM I 42,5 N-SR3 selon la NA 442 v 2013 et la EN 197-1 est conforme à la norme nationale NA 442 v 2013 et à la norme Européenne EN 197-1 avec un taux en CSA < 3%.

AVANTAGES PRODUIT

- Tout en étant un ciment de haute performance, **Mokaouem** protège la structure contre les agressions chimiques de l'environnement externe.
- Une meilleure durabilité pour les structures en béton.
- Une faible chaleur d'hydratation.

 A member of
LafargeHolcim

APPLICATIONS RECOMMANDÉES

- Les fondations et les structures à réaliser dans un milieu agressif
- Les travaux maritimes
- Les stations de dessalement et d'épuration
- Les travaux hydrauliques
- Les barrages et les digues de soutènement collinaire



FORMULATION CONSEILLÉE

	Ciment	Sable (sec)	Gravillons (sec)	Eau (litres)
Dosage pour béton C25/30	X 1	17	15	25 L

Remarque: un bidon = 10 Litres

Formulation de béton à suivre dans le cas de l'absence d'une étude dérivée par un laboratoire*

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

Analyses chimiques

	Valeur
Perte au feu (%) (NA5042)	0,5 à 3 %
Teneur en sulfates (SO3) (%)	1,8 à 3
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	1,2 à 3
Teneur en Chlorures(NA5042) (%)	0,01 à 0,05

Temps de prise à 20°

(NA 230)	Valeur
Début de prise (min)	> 60
Fin de prise (min)	240 à 400

Composition minéralogique

	Valeur
Taux d'aluminate C3A	<3,0%

Résistance à la compression

	Valeur
2 jours (MPa)	≥10
28 jours (MPa)	≥42,5

Propriétés physiques

	Valeur
Consistance Normale (%)	25 à 28
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm ² /g) (NA231)	3200 à 3800
Retrait à 28 jours (µm/m)	< 1000
Expansion (mm)	≤2,0
Chaleur d'hydratation	<270J/g

Ces valeurs sont données à titre indicatif et ne peuvent être considérées comme absolues

CONSIGNES DE SÉCURITÉ

- 1- **PROTÉGEZ VOTRE PEAU** : Portez les équipements adaptés dans vos chantiers: casques, lunettes, gants, genouillères, chaussures et vêtements de sécurité.
- 2- **MANUTENTION** : levez le sac en pliant les genoux et en gardant le dos droit.

A member of
LafargeHolcim



Conditionnement: /

LAFARGE ALGÉRIE

Bureau n°02, 14ème étage, tour Geneva,
les Pins maritimes, Mohammadia, Alger.
Tél: + 213 (0) 21 98 54 54
Fax: + 213 (0) 23 92 42 94
www.lafargealgerie.com
ds.satisfaction-clients@lafargeholcim.com
Tél: 021 98 55 55

LAFARGE
لوفارج

FICHE TECHNIQUE

BENTONITE DE FONDERIE

Composition Chimique

SiO ²	55 - 65	%
Al ² O ³	12 - 18	%
Na ² O ³	1 - 3	%
CaO	1 - 5	%
K ₂ O	0,76 - 1,75	%
MgO	2 - 3	%
PAF	6,9	%

Caractéristiques Physiques

Humidité	10	% max
Absorption au bleu de méthylène à 25 °C	26	ML
Compression à vert	1047	g/cm ²
Compression à sec	3200	g/cm ²
Cisaillement	190	g/cm ²

Granulométrie

74 µm granulométrie	98	% min
Résidu sur tamis 74 µm	2	% du poids max

Emballage

Palette de 1,25 tonnes
Big bag de 1,25 tonnes
Sac de papier Kraft de 50 kg

Livraison

Enlèvement par le client ou livraison