REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie Civil

Spécialité : Matériaux en génie civil

Etude expérimentale du comportement mécanique Des mortiers à base de bentonite sous l'effet de hautes températures et à milieux agressifs

Présenté par

LAOUFI islam

BOUKHELKHAL Abdelhakim

Proposé et Dirigé par

Dr. BOUKSANI Omar

Promotion Juin 2023

REMERCIEMENTS

Nous tenons tout d'abord à remercier ALLAH pour nous avoir guidés vers le bon chemin de la lumière et du savoir et pour nous avoir donné du courage et de la volonté afin de pouvoir réaliser ce modeste travail.

Nos remerciements à nos parents, pour leurs soutiens et leur encouragement pendant toute la vie, et qui vont continuer à nous aider dans tous les projets de l'avenir, ainsi que tous les membres de nos familles qui ont participé de près ou de loin à nous encourager et nous aider dans notre projet.

Nous tenons à exprimer notre profond remerciement à notre promoteur, **Dr. BOUKSANI omar**, pour l'encadrement de ce mémoire, son aide, sa patience et sa confiance qu'il nous a accordés.

Nous tenons à remercier aussi les membres de jury pour avoir accepté de juger notre travail.

Nos sincères remerciements vont également à tous les enseignants du département de Génie Civil de l'université de Médéa, et les enseignants qui ont participé à notre formation.

Dédicace

Je *dédie ce modeste travail a*

Mes chers parents qui nulle dédicace ne puisse exprimer mes sincères sentiments pour leur patience illimitée leur encouragement continu leur aide en témoignage de mon proton de amour et respect pour

leur grande sacrifices

A tous sœurs

A tous mes amis(es) ***«ISLAM, AYOUB, ABDELMONAIM, RABIE, YASMIN, RIMA, INES****. Qu'avec lesquelles j'ai partagé de très bon moments à l'université, et qu'ils vont trouver ici le témoignage d'une fidélité et d'une amitié infinie.*

BOUKHELKHAL Abdelhakim

Dédicace

Je dédie ce modeste travail aux être les plus chères pour moi :

A ***ma mère*** *et* ***mon père*** *qui étaient toujours à mes côtés et qui m'a toujours soutenue tout au long de ces années d'études, que j'ai pu accomplir avec succès.*

A mon frère : ***RAYANE****,*

A ma sœur : ***HIND***

A toute la famille : ***LAOUFI****, et à toute la famille*

A tous mes amis(es) : ***AYOUB, HAKIM, ABDELMONAIM,RABIE, RIMA, YASMINE, INES***

A toute la promotion de Génie Civil 2023.

LAOUFI islam

الملخص

.بصفة عامة المنشآت الأكثر استهلاكا للمواد الأولية هي مادة الإسمنت كما ان هذه المادة اصبحت تشكل ثالث اثار اساسية

هذه الدراسة موجية الى استخدام البنتونيت المتواجد بمنطقة مغنية والية تلمسان المتواجدة بالغرب الجزائري و ذلك بعد عملية الحرق كمادة جزئية في الاسمنت كبوزالن صناعي . كما تمت دراسة تأثير هذه الاضافة على الملاط وفقا لمقادير مدروسة من وزن الاسمنت وتعويضه بجزء من البنتونيت الذي تم حرق بمختلف النسب التالية(0% 10%20.% 30% 40.%) و هذه الاخيرة اجريت عليها تجارب خاصة في الحالة السائلة وفي الحالة الصلب. وكذلك هده التجربة اجريت عليها تجارب المتانة هجمات محلول الاسيد.

الملاط المحصل عليه ذات نتائج مرضية سواء بالنسبة لمقاومة الضغط او الديمومة وخاصة بالنسب للبنتونيت المضافة.

الكلمات الرئيسية هي البنتوني .استخدام الإسمنت. المقاومة الميكانيكية. الملاط .المتانة.

Résumé

La construction en générale est grande consommatrice de matières premières à base de ciment .Ces produits posent trois problèmes principaux :

Cette étude vise à apporter une contribution à la valorisation de la bentonite de Maghnia Wilaya de Tlemcen (Est Algérien) après calcination en substitution partielle au ciment en tant que pouzzolane artificielle. L'influence de cet ajout sur les mortiers a été étudiée. La bentonite a subi une calcination pour la rendre active puis incorporée en dosages définis substituables au ciment de bentonite calcinée par rapport au dosage en masse du ciment).ont également été formulés avec différents pourcentages de substitution de bentonite calcinée (0, 10, 20, 30, 40%). Ces derniers ont été caractérisés par des essais spécifiques à l'état frais et à l'état durci par l'essai de la résistance à la compression.

Aussi, ces mortiers ont été soumis à des essais de durabilité (Attaques de solution acide).

Mots clés : Bentonite, valorisation, ciment, résistance mécanique, mortier, durabilité.

Abstract

The construction in general is a major consumer of the raw materials to a cement base. These Products pose thrène main problems:

This study aims to contribute to the enhancement of the betonies of magnia, (county of tlemcen west of Algeria) after calcinations in partial substitution of the cement as artificial pozzolana.

This work shows the influence of this adding on mortars. The betonies has been claimed to become active and added with defined proportions to cement of cement weight). The acid concretes (SCC) have likewise formulated with different proportions of claimed betonies (0, 10, 20, 30, 40, %).

The sieve stability test and in the hardened state by the test of the resistance to compression.

Key words: Betonies, valorization, cement, mechanical resistance, mortar, durability.

Sommaire

Remerciement

Dédicace

Résumé

sommaire

liste des figures

liste des tableaux

Notations

Introduction **2**

Chapitre I

I.1.1 Béton de ciment Portland **5**

I.1.2 Historique du ciment Portland **6**

I.1.3Fabrication de ciment Portland **9**

I.1.3.1Collecte et préparation des matières premières **11**

I.1.3.2 Phase de prétraitement et de refroidissement **13**

I.1.3.3Dimensionnement du ciment Portland **14**

I.1.3.4 Expédition de ciment Portland **14**

I.1.3.5 Pollution de l'environnement par la fabrication de ciment Portland **15**

I.1.4Composition chimique du ciment Portland **17**

I.1.5 Hydratation du ciment Portland **19**

I.2.1 Pouzzolanes **22**

I.2.2 Histoire des pouzzolanes **23**

I.2.3 Types de pouzzolanes **23**

I.2.4 Chimie des pouzzolanes **24**

I.2.5 Évaluation des pouzzolanes **25**

I.3.1Argile bentonite **28**

I.3.2Calcination de l'argile bentonite **29**

I.3.3 Historique de l'argile bentonite dans les mélanges de liants **31**

I.3.4 Composition du la bentonite **33**

I.3.5 Types de bentonite **33**

I.3.6Utilisations de la bentonite **34**

I.3.7Propriété des bentonites **35**

I.3.8Trouve la bentonite **36**

Chapitre II

II.1Introduction **39**

II.2 Caractérisation des matériaux utilisés **39**

II.2.1Ciment **39**

II.2.2 Granulats **41**

II.2.2.1 Sable **41**

II.2.2.2Bentonite **42**

II.2.2.2.a caractérisation de la bentonite **43**

II.2.3 Eau de gâchage **43**

II.2.4 Adjuvent **43**

II.2.5Formulation et Composition des mortiers **44**

II.6 Préparation des mélanges **45**

II.7 Les essais sur le béton **47**

II.7.1 État durci **47**

II.7.1.1 Essai de la résistance à la traction par flexion **47**

II.7.1.2 Essai de la résistance à la compression **47**

II.7.1.3 Absorption d'eau par capillarité **48**

II.7.1.4 Absorption d'eau par immersion **49**

II.7.1.5 Porosité accessible à l'eau **49**

II.7.1.6 Résistance au feu **50**

II.7.1.7 Essai de résistances à l'acide **51**

Chapitre III

III.1 Introduction **54**

III.2 Propriétés à l'état durci des mortiers de bentonite **54**

III.2.1Densité **54**

III.2.2Résistance mécanique **55**

III.2.3Absorption par immersion **57**

III.2.4Porosité accessible au l'eau **58**

III.2.5Résistance au fau **59**

III.2.6Absorption d'eau par capillarite **62**

III.2.7 La résistance aux milieux basique **62**

Conclusion générale **67**

Recommandations **67**

Références bibliographiques **69**

Annexes **72**

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : ciment portland **5**

Figure I.2 : poudre ciment **9**

Figure I.3 : les étapes du fabrication de ciment **10**

Figure I.4 : Schéma de la production de ciment (Mindess, Young et Darwin, 2003) **10**

Figure I.5 : préparation des matières premières. **12**

Figure I.6 : prétraitement et de refroidissement **14**

Figure I.7 : Types de carburant (Ressources naturelles Canada, 2009). **15**

Figure I.8 : Allocation de carburant (Ressources naturelles Canada, 2009) **16**

Figure I.9 : Pouzzolanes **22**

Figure I.10 : Types de pouzzolanes **24**

Figure I.11 : Bentonite Calcinée **29**

Figure I.12 : barrage de Flaming Gorge **32**

Figure I.13 : Composition chimique de la bentonite **33**

Figure I.14 : Les types de bentonite **34**

Figure I.15 : Bentonite en Italie **37**

FigureI.16: Bentonite en Montana **37**

Chapitre II

Figure II.1 : Le ciment utilisé **40**

Figure II.2 : Sable moyenne d'Oued sauf **41**

Figure II.3 : Courbe granulométrique du sable utilisée **42**

Figure II.4 : la bentonite **42**

Figure II.5 : Adjuvant utilisé TOMPO-10 **43**

Figure II.6 : Le malaxeur utilisé **46**

Figure II.7 : Essai de traction par flexion sur éprouvette de béton **47**

Figure II.8 : Essai de compression sur éprouvette béton **48**

Figure II.9 : Essai de l'absorption d'eau par capillarité **48**

Figure II.10 : Essai de l'absorption d'eau par immersion **49**

Figure II.11 : Essai de porosité accessible à l'eau **50**

Figure II.12 : Résistance au feu **51**

Figure II.13 : acide utilise **52**

Chapitre III

Figure III.1 : Variation de la densité de chaque type de mortier(a) **54**

Figure III.2 : Variation de la densité de chaque type de mortier(b) **55**

Figure III.3 : la résistance à la flexion du mortier(a) **56**

Figure III.4 : la résistance à la compression du mortier(b) **56**

Figure III.5 : absorption de chaque type du mortier (a) **57**

Figure III.6 : absorption de chaque type du mortier(b) **57**

Figure III.7 : porosité de chaque type du mortier(a) **58**

Figure III.8 : porosité de chaque type du mortier(b) **58**

Figure III.9 : perte de masse avent et après fau(a) **59**

Figure III.10 : perte de masse avent et après fau(b) **60**

Figure III.11 : la résistance avent et après chauffes(a) **60**

Figure III.12 : la résistance avent et après chauffes(b) **61**

Figure III.13 : Absorption d'eau par capillarite **62**

Figure III.14 : Les éprouvettes avant et après immersion dans HCL **65**

Annexes

Figure 1 : Fiche technique de cimente utilise **72**

Figure 2 : Fiche technique de cimente utilise **73**

Figure 3 : Fiche technique d'adjuvant Tempo -10 **74**

Figure 4 : Fiche technique de bentonite **75**

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 : Composés de ciment Portland (Mindess, Young et Darwin, 2003) **17**

Tableau I.2: Composition d'oxyde de ciment Portland (Mindess, Young et Darwin, 2003) **18**

Tableau I.3: Désignations des types de ciment Portland (CSA A3000) **18**

Chapitre II

Tableau II.1 : L'analyse chimique du ciment et composition du clinker **40**

Tableau II.2 : Propriétés physiques d'identification de sable utilisé **41**

Tableau II.3 : Propriétés physiques de bentonite **43**

Tableau II.4 : Compositions des mortiers confectionnés(a) **44**

Tableau II.5 : Compositions des mortiers confectionnés(b) **44**

Tableau II.6 : Récapitulation des opérations de malaxage **46**

Chapitre III

TableauIII.1 : la résistance avent et après chauffes(a) **61**

TableauIII.2 : la résistance avent et après chauffes(b) **62**

Tableau III.3 : Les résultats de la perte de masse avant et après immersion dans HCL(a) **64**

Tableau III.4 : Les résultats de la perte de masse avant et après immersion dans HCL(b) **64**

Notations

Notations

M : La masse

V : Volume

C : Compacité

P : Porosité

M f : Le module de finesse

CPA : Le ciment portland artificiel

NF : Norme française

EN : Norme européenne

SiO2 : dioxyde de silicium

CaO : La chaux

Al2O3 : L'alumine

Fe2O3 : L'oxyde de fer

MgO: Oxyde de magnésium

Na2O : oxyde de sodium

K2O : oxyde de potassium

TiO2 : Dioxyde de titane

P2O5 : Pentoxyde de phosphore

C4AF : Tetra-calcium aluminoferrite

NaOH : Hydroxyde de sodium

Rt : La résistance à la traction

RC : La résistance a compression

M0 : Masse de l'éprouvette au moment du démoulage

M : Moment de flexion entre les deux points d'application de la charge

E : Dosage en eau

E/C : Rapport eau /ciment

M0% : Mortier de bentonite par 0%.

Introduction générales

1.1 Contexte

La production de ciment Portland est l'un des plus grands émetteurs de dioxyde de carbone dans l'atmosphère et il représente environ 7 % des émissions mondiales de CO2 chaque année (Monteiro, 2012).Une grande partie de cette pollution provient du combustible brûlé pour faire fonctionner un four à une température élevée de environ 1450°C d'autre coté elle provient de les réactions chimiques qui ont lieu pour produire le ciment Portland, spécifiquement la décomposition de la chaux en oxyde de calcium et en dioxyde de carbone (Hewlett, 2004).

Afin de réduire les émissions de CO2 liées à la production de ciment, des chercheurs ont étudié matériaux ayant des propriétés pouzzolaniques ou cimentaires.

Les pouzzolanes sont des matériaux qui réagissent chimiquement avec l'hydroxyde de calcium, appelé le pouzzolanique réaction, en présence d'eau, pour former des composés possédant des propriétés cimentaires (Mehta & Monteiro, 2006). Par conséquent, ils peuvent être utilisés en remplacement partiel du ciment dans un liant

Cela réduit la quantité de ciment Portland qui doit être ajoutée au mélange de liant, réduisant ainsi la quantité de dioxyde de carbone produite par les fabricants de ciment.

Le terme de roche bentonite est couramment utilisé pour le nom du minéral smectite qui est composé de plusieurs silicates hydratés de sodium, de calcium, de magnésium, de fer et de lithium et d'aluminium. Les noms des minéraux individuels du groupe comprennent la montmorillonite de sodium, le calcium montmorillonite, saponite (Mg), nontronite (Fe) et hectorite (Li) (Murray, 2007).

En utilisant de la bentonite argile comme pouzzolane, cela pourrait rendre un mélange de liants plus rentable et plus écologique durable que le ciment Portland ordinaire.

1.2 Objectifs

L'objectif de cette PFE est d'étudier l'avantage de l'utilisation d'une argile de bentonite calcinée en remplacement partiel du ciment Portland dans le mortier.

Les paramètres étudiés comprennent les propriétés physiques et mécaniques du mortier. Les propriétés mécaniques examinées incluent la résistance à la compression des éprouvettes de mortier en utilisant différents traitements thermiques de l'argile bentonite.

1.3 Portée des travaux

Afin d'atteindre l'objectif, la résistance à la compression du remplacement partiel de Portland ciment avec de l'argile bentonite (0, 10, 20, 30,40%), provenant de la région de maglic calciné à 200, 400, 600,800 et 900°C dans des cubes de mortier a été examiné.

1.4 Organisation de la thèse

Cette thèse est composée de 3 chapitres. Le chapitre 1 présente une introduction et Énumérer les objectifs d'étude des travaux entrepris et une revue de la littérature qui explore le ciment Portland, les pouzzolanes et l'argile bentonite. Le ciment Portland est présent en ses histoires, fabrication, compositions chimiques et réactions. L'histoire, les types, la chimie et l'évaluation des pouzzolanes sont discutées. La revue de la littérature sur l'argile bentonite étudie la minéralogie, l'histoire de son utilisation dans les mélanges de liants, et la calcination de l'argile bentonite. Le chapitre 2 est la caractérisation des matériaux utilise la méthodologie expérimentale de la résistance à la compression tests, tandis que le chapitre 3 couvre les résultats des tests de compression, traction, porosité accessible, absorption résistance au fau, résistance au milieu acide.

CHAPITRE I

Recherche bibliographique

I.1.1 Béton de ciment Portland

Le béton de ciment Portland est le matériau de construction le plus utilisé au monde (Mamlouk & Zaniewski, 1996).



Figure I.1 : ciment portland **[2]**

Le béton est un mélange hétérogène de ciment, d'eau, d'air, de granulats grossiers, de granulats fins et de divers adjuvants avec des ratios en fonction des propriétés souhaitées soit à l'état frai (plastique) et/ou le béton durci. La qualité et les propriétés du béton dépendent de la qualité de sa pâte et des agrégats, et la liaison entre les deux (Kosmatka & Wilson, 2011).

Le béton n'est pas aussi solide ni résistant que l'acier; cependant, c'est la construction la plus largement utilisée pour au moins quatre raisons principales.

1-La première raison étant que le béton possède d'excellentes :

* résistance à l'eau. Sa capacité à résister à la détérioration causée par l'eau par rapport à la rouille

*l'acier et la pourriture du bois sont remarquables. Le béton brut est utilisé presque partout dans le monde

*lorsqu'il est utilisé pour les barrages, les revêtements de canaux, les trottoirs, etc. Le béton armé et précontraint peut être vu dans les éléments structuraux qui sont exposés à l'humidité et à d'autres composés chimiques

* pieux, fondations, semelles, planchers, poutres, colonnes, toits, murs extérieurs et tuyaux (Mehta & Monteiro, 2006).

2-La deuxième raison pour laquelle le béton est le matériau de construction le plus largement utilisé est la facilité de construction en ce que différents éléments peuvent être formés dans une variété de formes et de tailles. Fraîchement le béton gâché, de consistance plastique, peut s'écouler facilement dans un coffrage puis après plusieurs les heures durcissent, formant une masse solide permettant de retirer le coffrage et éventuellement de le réutiliser (Mehta et Monteiro, 2006).

3-La troisième raison pour laquelle le béton est le matériau d'ingénierie le plus largement utilisé est qu'il est généralement le matériau le moins cher et le plus facilement disponible pour la plupart des travaux (Mehta & Monteiro, 2006).

Les principaux composants du béton – ciment Portland, eau, granulats – sont peu coûteux et facilement disponible dans la plupart des régions du monde.

4-La quatrième considération est que le béton est durable car il ne se corrode pas, n'a généralement pas besoin traitement de surface et sa résistance devrait augmenter avec le temps; par conséquent, un bon béton nécessite peu d'entretien. La résistance au feu est également l'une des caractéristiques les plus importantes du béton, avec une couverture de béton adéquate pour les armatures/câbles précontraints la capacité calorifique d'un élément en béton peut être assez élevée avant sa rupture en raison de la chaleur affectant les éléments de renforcement (Callister, 2007). **[1]**

I.1.2 Historique du ciment Portland

En 1759, John Smeaton, un ingénieur civil, devait reconstruire le phare d'Eddystone, qui avait auparavant succombé deux fois aux éléments, une fois à l'eau et une fois au feu. Smeaton était arrivé au "vrai" principe d'un mortier hydraulique suffisamment solide pour résister aux violentes tempêtes et l'influence de la mer

auxquelles le phare a été exposé. Après essai de différents calcaires d'Angleterre, Smeaton a pu établir le principe que certains calcaires lorsqu'ils sont mélangés avec du sable durci sous l'eau. Il a trouvé ces calcaires lorsque dissous dans de l'acide chlorhydrique avait un résidu de quinze à vingt-cinq pour cent de solides. Le résidu était principalement composé de silice et d'alumine, qui sont pratiquement les mêmes constituants des pouzzolanes romaines (American Cement Company, 1895).

En raison de la découverte de Smeaton, la recherche de ces calcaires hydrauliques a été faite partout Angleterre. Ces calcaires sont devenus le premier ciment naturel connu du commerce, et à la suite le seul ciment étant connu à l'époque où le matériau a reçu le nom de ciment romain. C'était produit par « simple extraction de calcaires argileux, ou dolomies, contenant certaines pourcentages de chaux, magnésie, silice et alumine ; calciner les roches brisées dans des fours à ciel ouvert, avec du charbon à feu doux, et en extrayant le produit calciné en continu des fours, et en le broyant entre meules » (American Cement Company, 1895) Les expériences réalisées par Smeaton ont été suivies par l'ingénieur anglais General Sir C.

En 1898 William Paisley (Lesley, 1898). Sir Paisley a effectué une vaste série d'expériences, chimique, et autres, pour déterminer comment produire des ciments artificiels correspondant à les qualités supérieures de chaux hydraulique décrites par Smeaton.

Au cours de la même période, L'ingénieur et chimiste français Vicat effectuait des tests similaires à Paisley, cependant, les tests inclus plus d'éléments. La conclusion de ses travaux a conduit au développement d'un Portland matériau cimentaire produit par le mélange d'argile et de craie à des températures de calcination élevées pour début de vitrification (Lesley, 1898).

1824 Cependant, le premier homme à produire du ciment Portland fut Joseph Aspdin, un maçon. De Leeds en Angleterre. Il obtint un brevet en 1824 et put produire le premier produit commercial Ciment Portland par calcination à feu vif, d'un mélange de craies anglaises avec de l'argile de rivières.

Aspdin a complété les calcinations en produisant du clinker dans des fours fermés. Le clinker était broyé pour former du ciment Portland. Le nom "Portland" a été inventé car la couleur était similaire au bien- Pierre de construction connue « Portland » d'Angleterre.

Les premières autorités sur le ciment étaient les fabricants. En 1860, le ciment Portland était bien établi dans toute l'Europe, comme presque tous les grands travaux publics construits avec lui. Les travaux de Portland Cément ont été lancés en Belgique, en France, en Allemagne et en Autriche peu de temps après fabrication réussie du ciment Portland en Angleterre. Cette augmentation des fabricants a donné lieu aux premiers essais. De 1860 à 1870 et au-delà, des installations d'essai officielles pour le ciment ont été établi dans divers endroits sur le continent européen sous les auspices du gouvernement ; tandis que dans En Angleterre, plusieurs ingénieurs notables ont établi des laboratoires sous gestion individuelle (American Cement Company, 1895).

Ce n'est qu'après la guerre civile aux États-Unis que le ciment Portland a commencé à apparaître dans Amérique du Nord. De 1865 à 1876, tout le ciment Portland a été importé de l'étranger et en raison de là le secret et le manque de compréhension des propriétés et de la fabrication du ciment Portland. C'était pensé pendant de nombreuses années qu'aucun ciment Portland ne pouvait être fabriqué en Amérique du Nord. Avec la quantité et la taille accrues des travaux de génie civil (tunnels, ponts, barrages, réservoirs, etc.) étant entreprise dans les années 1870, une demande accrue de ciment Portland a augmenté sur le marché américain.

Ainsi, une grande quantité d'importations se produisait et avec cela dans le comté de Lehigh, en Pennsylvanie, David O. Saylor, s'est engagé dans la fabrication de ciment commun, cependant, son attention avait naturellement été appelé aux importations du ciment Portland et voulu fabriquer un tout aussi bon produit aux États-Unis. Après plusieurs années de travail et d'essais en 1878 avec le l'aide de John W. Eckart, récent diplômé de l'Université de Lehigh, ils ont réussi à création de la première cimenterie Portland commerciale aux États-Unis (American Cement Compagnie, 1895).

La première production canadienne a eu lieu en 1889 à Hull, au Québec, et d'autres productions ont suivi en Napanee et Shallow Lake Ontario et sur l'île de Montréal. La première usine de l'Ouest canadien a été construit à Vancouver, en Colombie-Britannique, en 1893 (Serne, 2012).

En 2009, la production de ciment au Canada représentait environ 2 000 emplois, avec 14,3 millions de tonnes de ciment produit pour une valeur de 17 milliards de dollars. Ceci est produit à partir de 15 ciments Portland gris et une installation de ciment Portland blanc (Ressources naturelles Canada, 2009). **[1]**



Figure I.2 : poudre ciment **[3]**

I.1.3Fabrication de ciment Portland

Le processus de fabrication du ciment lui-même est une série de 4 processus différents illustrés La première étape consiste à rassembler et à préparer les matières premières. La deuxième étape est la prétraitement/refroidissement, où les matières premières sont modifiées chimiquement et physiquement le four pour produire du ciment

Portland, puis refroidi. La troisième étape consiste à modifier le matériau chimiquement modifié à la bonne taille de particules dans une usine de finition. Le processus final est l'expédition du ciment Portland au client. **[1]**

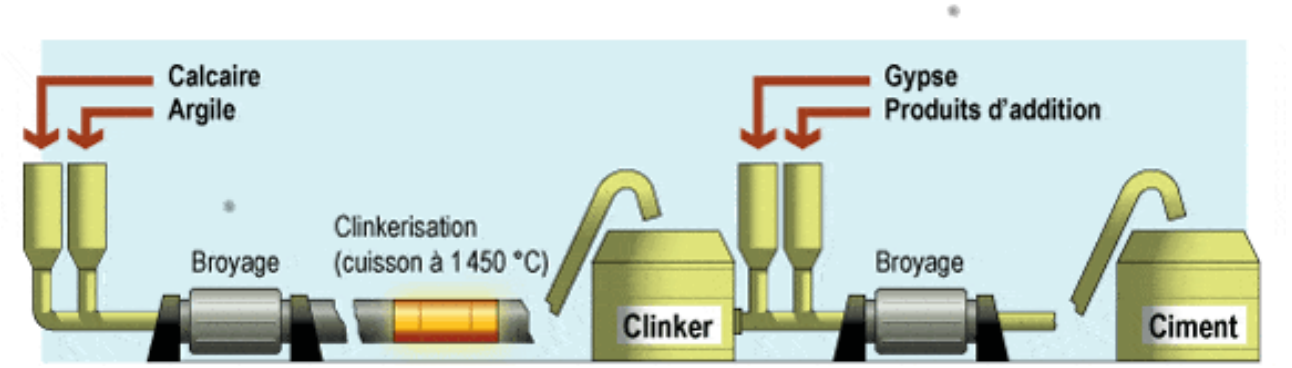


Figure I.3 : les étapes du fabrication de ciment **[4]**

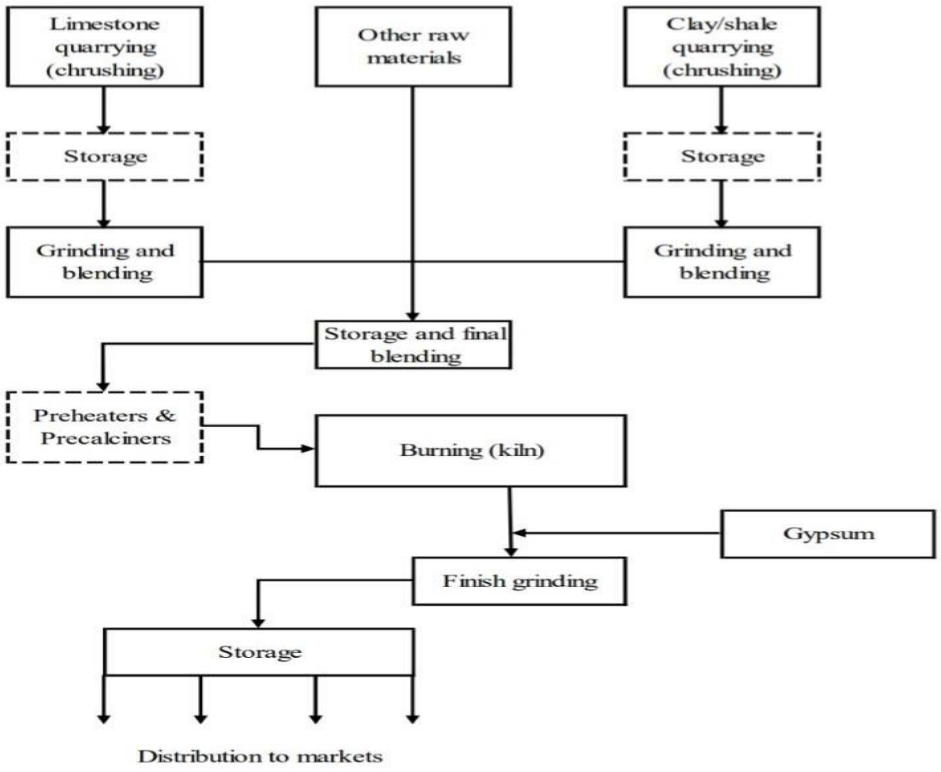


Figure I.4 : Schéma de la production de ciment (Mindess, Young et Darwin, 2003**). [1]**

Il existe également différents styles de cimenteries; cependant, le processus ci-dessus est similaire dans chacun. Les différents types de plantes peuvent déterminer comment les matériaux sont utilisés et la quantité d'énergie nécessaire dans une plante. Les différents types de plantes comprennent:

- Sec

- À moitié sec

- Mouiller

- Semi-humide

Dans les procédés de fabrication à sec, les matières premières sont déshydratées et broyées pour Forment une poudre fluide qui peut être introduite dans un préchauffeur, un précalcinateur ou un système de séchoir long. Dans les plantes semi-sèches, plutôt qu'une poudre coulante, les matières premières sont séchées, broyées puis sont pelletisé avec de l'eau (12-14%). Les palettes sont introduites dans un préchauffeur à grille avant le four ou dans un four long avec croix. Dans le procédé par voie humide, les matières premières sont broyées séparément pour faire les boues sont ensuite mélangées et pompées directement vers le four ou le séchoir à boues. Le style humide du processus est devenu obsolète en raison d'une meilleure technologie de broyage et de l'utilisation de haute énergie pour sécher la bouillie. Le processus semi-humide prend la boue du processus filtré déshydraté et les matériaux sont soit transformés en granulés, introduits dans le préchauffeur de grille, soit finement broyés pour produire poudre fluide (Berdowski, et al. 2009). Quant au type de processus de production de ciment construit, cela a été déterminé par les matières premières locales et la technologie de l'époque. Les l'emplacement des usines sont généralement à proximité d'une carrière de calcaire et d'autres matières premières pour réduire frais d'expédition et modification du matériel avant l'expédition. **[1]**

I.1.3.1Collecte et préparation des matières premières

Les matières premières entrant dans le processus de fabrication du ciment sont l'oxyde de calcium, l'oxyde de silicium, l'oxyde d'aluminium et l'oxyde ferreux. Ces

matériaux se présentent généralement sous la forme de calcaire, craie, marne, gypse et/ou argile. Il est important d'utiliser des matériaux d'une pureté adéquate et uniformes composition dans le processus de fabrication pour maintenir une production de haute qualité. Il est important de noter que la fabrication du ciment Portland est généralement composée aux deux tiers de matériaux calcaires (calcaire), et un tiers de matières argileuses, ferrifères et siliceuses (alumine, fer, silice) (Monteiro, 2012). En moyenne 1,57 tonne de matière première est utilisée dans la production d'1 tonne de clinker (Berdowski, et al. 2009).

Toutes les matières premières proviennent d'un certain type de carrière ou de mine, les opérations à ces endroits consisteront d'abord à forer, dynamiter et excaver les matériaux. Une fois les matériaux collectés, ils sont expédiés à l'usine de fabrication. Là, ils sont broyés et passés au crible avant de les stocker/stocker pour les utiliser dans le processus de fabrication (Oley, 1998). **[1]**

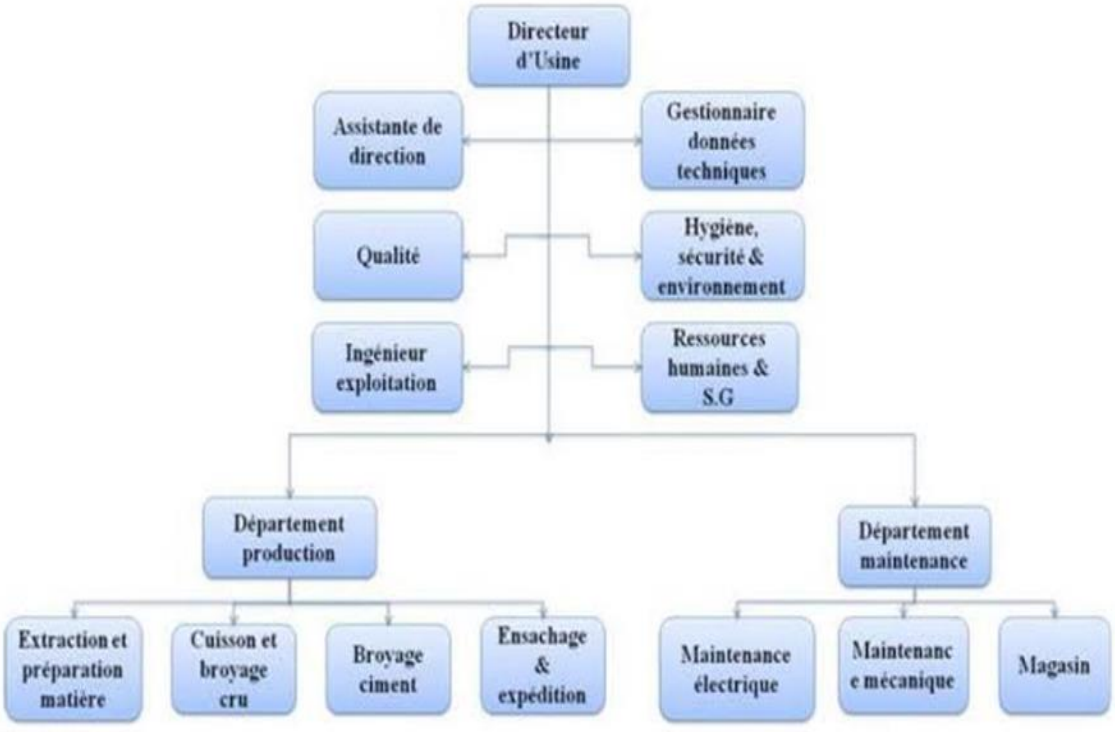


Figure I.5 : préparation des matières premières. **[5]**

I.1.3.2 Phase de prétraitement et de refroidissement

La phase de prétraitement et de refroidissement correspond à la phase de traitement chimique et Changements physiques à haute température pour créer les propriétés du ciment Portland hydraulique. Les matières premières sont extraites du processus initial et alimentent une tour de préchauffage, chauffent échangeur, ou directement dans le four selon la cimenterie. Un préchauffage la tour est utilisé dans les nouvelles installations avec un système d'alimentation sèche. Un échangeur de chaleur peut également être utilisé pour réduire la longueur du four. Les usines de type procédé humide auront un long four qui peut mesurer 6 m de long diamètre et 180 m de longueur. Lorsque les matériaux sont traités, ils resteront dans le four pendant 2,5 heures. Avec le procédé à sec, le temps est réduit à environ 1 à 1,5 heures, et si le une tour de préchauffage a été utilisée, le matériau peut être traité en aussi peu que 20 minutes dans un four de 80 m longue. Tous les fours tourneront généralement à 60 à 200 tours par heure et produiront plus de 5000 tonnes/jour pour les fours humides (Mindess, Young, & Darwin, 2003).

Une fois que les matières premières ont terminé tout préchauffage, elles sont introduites dans le four. Dans le four, les matériaux sont sèche ou sera séchée, préchauffée, frittée, puis clinkérisée. Une fois clinkérisé, le mélange est refroidi à certains taux pour maintenir les propriétés souhaitables. La première réaction chimique à avoir lieu est la calcination du calcaire en oxyde de calcium, à environ 900°C. Dans cette réaction, un tiers du calcaire est converti en CO2 (Oley, 1998). Le prochain processus à avoir lieu est la réaction de l'oxyde de calcium avec la silice, l'alumine et les oxydes ferreux pour former les silicates, les aluminates et ferrites du clinker, cela se produit entre 1400 et 1500°C (Berdowski, et al., 2009).

Il faut environ 1700MJ/tonne de clinker pour que les réactions aient lieu dans le four, non y compris les phases de séchage et de préchauffage ; cependant, il faut 3500 à 5000MJ/tonne de clinker pour allumer le four lui-même (Berdowski, et al. 2009). Le clinker est ensuite refroidi pour conserver les propriétés souhaitées. Les refroidisseurs les plus courants sont grille alternative, planétaire et rotative et nécessite généralement 1 à 2 kg d'air/kg de clinker pour refroidir le clinker. Certaines usines peuvent réutiliser cet air

dans la phase de séchage avec les matières premières (Oley, 1998). Le clinker sort dans le refroidisseur sous forme de nodules gris durs dont la taille varie de 0,3 à 5 cm. Taille. **[1]**

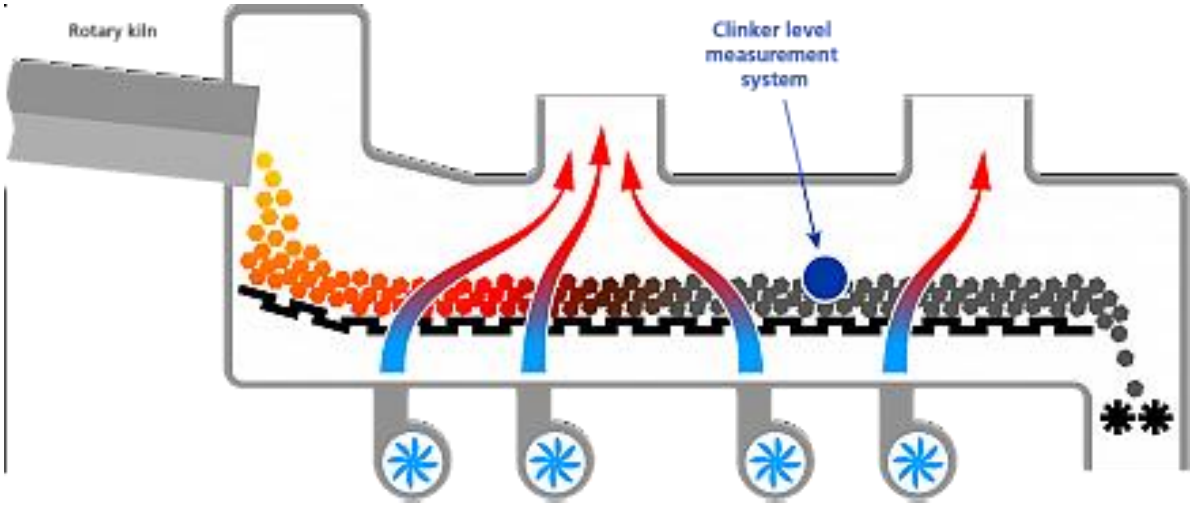


Figure I.6 : prétraitement et de refroidissement. **[6]**

I.1.3.3Dimensionnement du ciment Portland

Pour broyer le clinker, la plupart des usines utilisent un système fermé où le clinker est mélangé avec jusqu'à 5% gypse (sulfate de calcium) / anhydrite naturelle, pour maîtriser le temps de prise. Le mélange est placé dans un broyeur à rouleaux pour la réduction de taille primaire, puis envoyé dans un broyeur à boulets pour obtenir la granulométrie souhaitée. Un séparateur d'air est utilisé pour diviser les particules par taille et trop gros les particules sont placées à nouveau dans le broyeur, jusqu'à ce que les exigences de taille soient satisfaites (Oley, 1998). **[1]**

I.1.3.4 Expédition de ciment Portland

Le ciment est ensuite extrait du broyeur de finition avec des élévateurs et des bandes transporteuses pour être stocké dans silos. Ensuite, le ciment Portland est transporté dans des sacs à parois multiples, en vrac par route, par rail ou par bateau jusqu'à son destination finale. **[1]**

I.1.3.5 Pollution de l'environnement par la fabrication de ciment Portland

La quantité de CO2 rejetée dans l'atmosphère par la fabrication du ciment Portland est environ 0,5320 kg pour la décomposition du CaCO3, 0,3276 kg pour le chauffage du four et 0,03293 kg pour les opérations du four autres que le chauffage, pour 1 kg de ciment Portland créé (Hewlett, 2004).

Dans la production de ciment, l'utilisation de combustibles fossiles à forte intensité de carbone est importante. Les combustibles les plus utilisés sont produits du charbon et du coke de pétrole, cependant, il existe de nombreuses autres sources et sont présentées dans Illustration. **[1]**

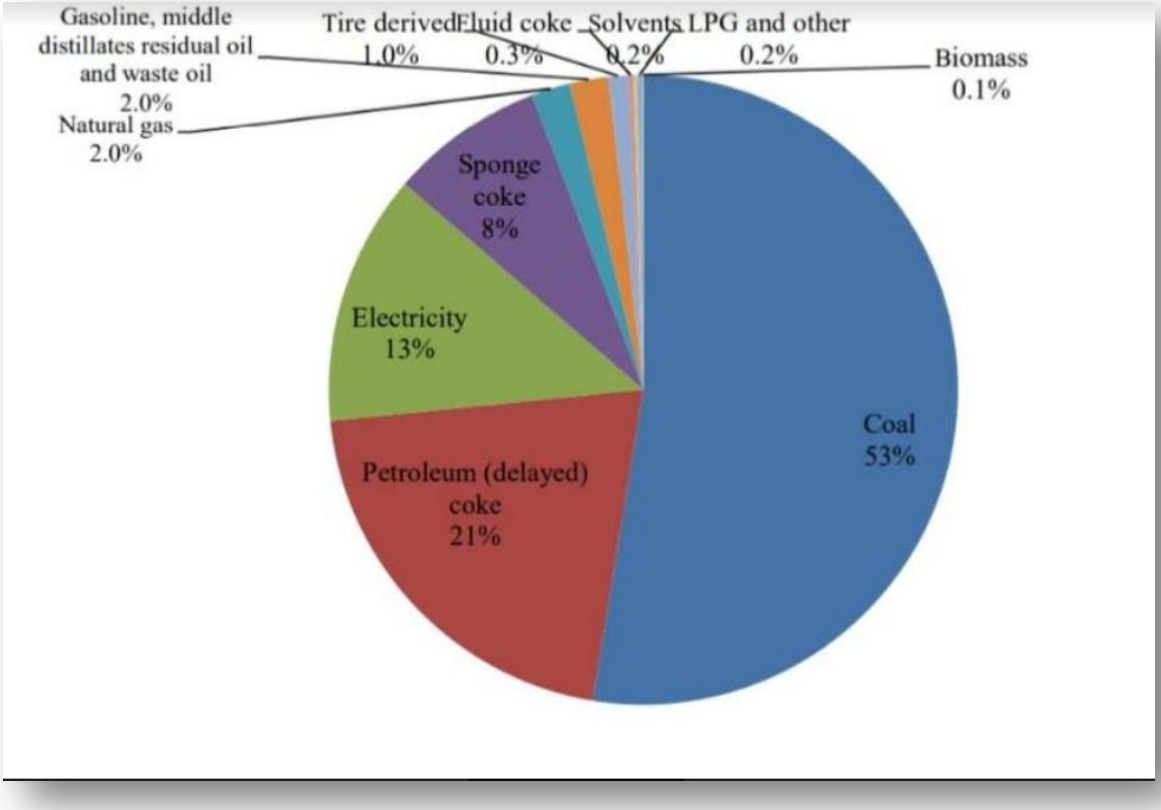


Figure I.7 : Types de carburant (Ressources naturelles Canada, 2009). **[1]**

L'énergie est utilisée dans de nombreux domaines différents du processus de fabrication du ciment. Il est important de noter que la plus grande consommation d'énergie est dans le four avec environ 85%. Dans la figure I.8, il peut être vu que la préparation et la

finition des matériaux représentent 4% et 5% de la consommation d'énergie respectivement. **[1]**

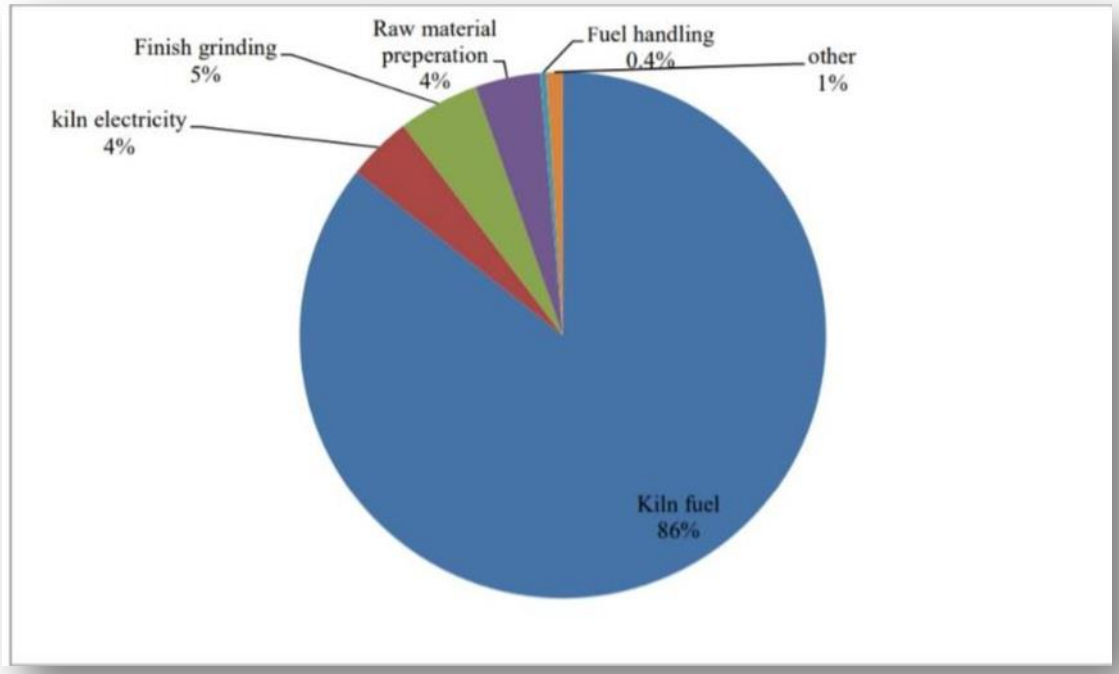


Figure I.8 : Allocation de carburant (Ressources naturelles Canada, 2009). **[1]**

La production de ciment représente environ 7 % des émissions mondiales de CO2 (Monteiro, 2012). La majorité des émissions proviennent de l'exploitation de l'usine et le CO2 de la transformation du calcaire en chaux. D'autres émissions nocives dépendent des matières premières et des combustibles pour la plante et comprennent :

*Différents oxydes d'azote (NOx);

* Anhydride sulfureux (SO2) et autres composés soufrés ;

* Poussière

* Composés organiques volatils (COV)

* Dibenzodioxines et dibenzofuranes polychlorés (PCDD et PCDF) ;

* Métaux et leurs composés;

* Fluorure d'hydrogène (HF);

* Chlorure d'hydrogène (HCl);

* Monoxyde de carbone (CO);

* Ammoniac (NH3).

I.1.4Composition chimique du ciment Portland

Le ciment le plus couramment utilisé est le ciment Portland, un matériau gris extrêmement fin. Composé de silicate dicalcique, de silicate tricalcique, d'aluminate tricalcique et de tétracalcium aluminoferrite, additionnée de sulfate de calcium (tableau I.1 et tableau I.2); pourtant il y a Différents types de ciment Portland avec différentes compositions et finesse pour différents Applications et situations (tableau I.3). **[1]**

Tableau I.1 : Composés de ciment Portland (Mindess, Young et Darwin, 2003). **[1]**

composé	formule chimique	abréviation	pourcentage de poids
Silicate tricalcique	3caO.siO2	C3S	55
Silicate dicalcique	2CaO.SiO2	C2S	18
Silicate tricalcique	2Cao.Al2O3	C3A	10
Alliminofirrite tricalcique	4Cao.Al2O3.Fe2O3	C4AF	8
Gypse	CaO.SO3.2H2o	CSH2	6

Tableau I.2: Composition d'oxyde de ciment Portland (Mindess, Young et Darwin, 2003). **[1]**

composé	abréviation	Nom commun	Pourcentage de poids
Cao	C	chaux	64.67
SiO2	S	silice	21.03
Al2O3	A	alumine	6.16
Fe2O3	F	oxyde de fer	2.58
MgO	M	magnésie	2.62
K2o	K	alcalis	0.61
Na2O	N		0.34
SO3	S	trioxyde de soufre	2.03

Tableau I.3: Désignations des types de ciment Portland (CSA A3000). **[1]**

Type	Description	Précédent TYPE	ASTM type
GU	Ciment hydraulique à usage général	10	I
MS	Ciment hydraulique moyennement résistant aux sulfates	20	II
MH	Ciment hydraulique à chaleur d'hydratation modérée	20	II(MH)
HE	Ciment hydraulique à haute résistance initiale	30	III
LH	Ciment hydraulique à faible chaleur d'hydratation	40	IV
HS	Ciment hydraulique à haute résistance aux sulfates	50	V

Le ciment de type GU est la construction la plus générale, la chaussée, les réservoirs, les tuyaux, etc. et à un niveau assez élevé Contenu C3S pour le développement précoce de la force résistance. Le type MS contient moins de 7,5 % de C3A et est utilisé lorsqu'une protection contre l'attaque modérée des sulfates est justifiée, par exemple certaines eaux ou certains sols les types. Le type MH est spécialement fabriqué pour générer une chaleur d'hydratation plus faible que le type GU et est utilisé pour les structures de masse considérable telles que les grands piliers et les grandes fondations. Taper HE est utilisé lorsqu'une résistance initiale élevée est justifiée. Il est physiquement et chimiquement similaire à GU, mais les particules sont broyées plus finement pour provoquer une réaction plus rapide. Il est utilisé par temps froid ou lorsqu' les formulaires doivent être retirés dès que possible. Le type LH est lorsqu'une faible chaleur d'hydratation est justifiée et est utilisé dans des projets tels que les grands barrage-poids. Le type HS est hautement résistant aux sulfates ciment pour offrir une meilleure résistance aux sulfates que le type MS, où la teneur en C3A doit être conservée inférieur à 3,5 % dans le ciment (Kosmatka & Wilson, 2011). **[1]**

I.1.5 Hydratation du ciment Portland

L'hydratation du ciment Portland correspond aux multiples réactions chimiques entre le ciment Portland clinker de ciment, sulfate de calcium et eau. La progression de l'hydratation dépend de la Suivant:

* Taux de dissolution dans les différentes phases

* Vitesse de nucléation et croissance cristalline des hydrates formés

* Vitesse de diffusion de l'eau et des ions dissous à travers les matériaux hydratés

Précédemment formé

Les premières phases d'hydratation sont dépendantes de la dissolution du clinker et du gypse. Comme le l'hydratation du ciment Portland se poursuit, le processus devient plus dépendant du taux de nucléation et croissance cristalline. Vers la fin du processus d'hydratation, le processus devient plus dépend de la diffusion de l'eau et des ions dissous à travers le matériau hydraté déjà formé (Hewlett, 2004).

La nano et micro structure du matériau formé dépend de la composition du liant, le rapport eau/liant, la température d'hydratation et la présence ou l'absence de produit chimique adjuvants.

La cinétique d'hydratation dépend de nombreux facteurs dont les suivants (Hewlett, 2004) :

* L'ajout d'adjuvants chimiques

* La température d'hydratation

* Les méthodes de cure utilisées

* Les méthodes de traitement du clinker utilisées

* La finesse du ciment

* La quantité et la qualité du sulfate de calcium

*Les méthodes de fabrication et les propriétés chimiques/physiques du clinker

Les principales réactions chimiques d'hydratation du ciment Portland sont les suivantes (Mamlouk &Zaniewski, 1996):

- $2(3CaO \cdot SiO2) + 6H2O = 3CaO \cdot 2SiO2 \cdot 3H2O + 3CaO\ (OH)2$

Silicate tricalcique + Eau = Silicate de calcium hydraté + Hydroxyde de calcium

- $2(2CaO \cdot SiO2) + 4H2O = 3CaO \cdot 2SiO2 \cdot 3H2O + CaO(OH)2$

Silicate dicalcique + Eau = Silicate de calcium hydraté + Hydroxyde de calcium

- $3CaO \cdot Al2O2 + 12H2O + Ca(OH)2 = 3CaO \cdot Al2O2 \cdot Ca(OH)2 \cdot 12H2O$

Aluminate tricalcique + Eau + Hydroxyde de calcium = Aluminate de calcium hydraté

- $4CaO \cdot Al2O2 \cdot Fe2O2 + 10H2O + 2Ca(OH)2 = 6CaO \cdot Al2O2 \cdot Fe2O2 \cdot 12H2O$

Alumino ferrite tétra calcique + Eau + Hydroxyde de calcium = Hydrate d'alumino ferrite de calcium

- $3CaO \bullet Al2O2 + 10H2O + CaSO2 \bullet 2H2O = 3CaO \bullet Al2O2 \bullet CaSO2 \bullet 12H2O$

Aluminate tricalcique + Eau + Gypse = Mono sulfo aluminate de calcium hydraté

Les silicates s'hydratent plus lentement que les aluminates. L'aluminate tricalcique réagit avec l'eau immédiatement et expulse de grandes quantités de chaleur. Du gypse est ajouté au ciment Portland pour ralentir la taux d'hydratation de l'aluminate. Une fois que le gypse est mis en solution, des ions sulfate sont produits qui suppriment la solubilité des aluminates.

Le silicate de calcium hydraté (C-S-H) se forme lorsque les silicates de calcium se combinent avec l'eau. Le C-S-H les cristaux commencent à se former quelques heures après le mélange du ciment Portland et de l'eau et continuent à se développer tant qu'il y a des particules de ciment et de l'eau libre qui n'ont pas encore réagi. Silicate l'hydratation produit à la fois du C-S-H et de l'hydroxyde de calcium. L'hydratation complète de C3S se traduit par 39 % d'hydroxyde de calcium et 61 % de C-S-H, et l'hydratation complète de C2S produit 82 % de C-S- H et 18% d'hydroxyde de calcium. C-S-H fournit la résistance au ciment Portland hydraté. Il est avantageux de pouvoir augmenter la quantité de C2S par rapport à C3S. L'ajout de gypse augmente également le taux de développement du C-S-H car le C3S s'hydrate plus rapidement que le C2S (Kosmatka & Wilson, 2011).

Le processus de développement de la structure commence immédiatement après l'ajout d'eau au ciment. Les l'eau devient alors alcaline en moins de dix minutes. Comme le ciment hydrate le volume de ciment particules diminue, augmentant ainsi l'espace entre les particules. Au cours des premières étapes de des liaisons faibles d'hydratation peuvent se former, notamment sous forme de C3A ; avec une hydratation supplémentaire, le mélange devient verrouillage plus fort de la structure et du matériau en place. L'ensemble final se produit lorsque C-S-H développe une structure rigide, l'espacement entre les grains augmente au fur et à mesure que les grains sont consommés par hydratation et tous les composants sont verrouillés en place. Le ciment continuera à durcir jusqu'à ce que

toutes les particules d'eau libre et de ciment non hydratées se sont hydratées, avec le taux d'hydratation diminue avec le temps (Mamlouk & Zaniewski, 1996). **[1]**

I.2.1 Pouzzolanes

Les pouzzolanes sont des matériaux siliceux ou siliceux et alumineux qui possèdent en eux-mêmes peu ou aucune valeur cimentaire, mais lorsqu'ils sont finement divisés et en présence d'humidité, ils réagir chimiquement avec l'hydroxyde de calcium à température ambiante pour former des composés possédant propriétés cimentaires (silicates de calcium hydratés et silicates de calcium aluminate hydratés). (Kosmatka et Wilson, 2011) Des spécifications reconnues pour les matériaux cimentaires tels que les cendres volantes et les pouzzolanes naturelles sont indiqué dans ASTM C 618 ou CSA A3000 selon la juridiction et la norme respective les méthodes d'essai sont spécifiées dans la norme ASTM C 311 ou CSA A3000. **[1]**



Figure I.9 : Pouzzolanes. **[7]**

I.2.2 Histoire des pouzzolanes

La plus ancienne utilisation de la pouzzolane dans un liant hydraulique connue à ce jour est un mélange de chaux et de pouzzolane, terre de diatomées du golfe Persique datant de 5000 à 4000 av. Le suivant la plus ancienne pouzzolane utilisée était la cendre volcanique produite à partir de deux éruptions volcaniques ; à la fois volcanique éruptions étant dans la région méditerranéenne. La première éruption entre 1600 et 1500 AVANT JC. Sur l'île égéenne ou Thera, maintenant Santorin, Grèce et l'autre était le mont. Vésuve sur la baie de Naples, Italie en 79 A.D. Les deux cendres volcaniques se composaient à 80 % de verre (pierre ponce et obsidienne) (Malinowaki, et al. 1993)

Les Grecs entre 700 et 600 av. découvert des mélanges pouzzolane-chaux et cette connaissance passa aux Romains vers 150 av. Les Romains pendant leurs 600 ans de domination découvert et développé une variété de pouzzolanes à travers leur empire (Kirby, Withington, Darling & Kilgour, 1956). De nombreuses structures qui ont été construites pendant l'Empire romain à l'aide de liant pouzzolane-chaux sont en usage aujourd'hui et constituent un hommage à la performance de la chaux- mortiers de pouzzolane. (Comité ACI 232, 2000). **[1]**

I.2.3 Types de pouzzolanes

Les matériaux pouzzolaniques sont généralement classés en deux catégories différentes, la première étant naturelle pouzzolanes et la seconde étant des pouzzolanes artificielles. Les pouzzolanes naturelles sont des matériaux naturels qui ne nécessitent pas de traitement supplémentaire qui altère les propriétés chimiques. Les pouzzolanes naturelles, cependant, nécessitent généralement un broyage pour obtenir une granulométrie souhaitée. Types de pouzzolane naturelle inclure, mais sans s'y limiter, des roches incohérentes (pouzzolane italienne), des matériaux zéolitiques (trass,tuf jaune), terres blanches italiennes et terres diatomées.

Les pouzzolanes artificielles sont le résultat d'une altération chimique / structurelle d'un matériau à l'origine ayant peu ou pas d'activité pouzzolanique. Des exemples de pouzzolanes artificielles comprennent les cendres volantes, les argiles, schiste brûlé et fumée de silice. La division des deux classes de naturel et d'artificiel la pouzzolane n'est pas toujours bien définie car certains matériaux, tels que le taupe danois,

la gaze française et les tufs ryolitiques des USA, contiennent des pouzzolanes naturelles ainsi que des argiles qui prennent de fortes caractéristiques pouzzolaniques après cuisson (Hewlett, 2004).**[1]**



Figure I.10 : Types de pouzzolanes. **[8]**

I.2.4 Chimie des pouzzolanes

Il est important de comparer la réaction d'hydratation du ciment et des pouzzolanes pour comprendre les différences dans leurs comportements.

Réaction d'hydratation du ciment Portland

- $C3S + H \rightarrow C - S - H + CH$

Silicate tricalcique + Eau = Silicate de calcium hydraté + Hydroxyde de calcium

Pouzzolane Ciment Portland Réaction d'hydratation

- Pouzzolane + CH + H → C − S − H

Pouzzolane + Hydroxyde de calcium + Eau = Silicate de calcium hydraté L'utilisation de ciments pouzzolanes présente trois avantages techniques généraux, qui peuvent être déterminée lors de l'examen de la réaction d'une pouzzolane et d'hydroxyde de calcium. Le premier avantage étant la réaction lente. Une réaction plus lente par rapport à l'OPC est qu'il fournit un taux de développement de la résistance et dégagement de chaleur.

Le deuxième avantage est que la réaction est le calcium consommation d'hydroxyde par rapport à la réaction OPC produisant de l'hydroxyde de calcium, ce qui aide à la durabilité de la pâte hydratée en milieu acide, cela se voit dans les réactions montré ci-dessus. Le troisième avantage est que le ciment pouzzolane a la capacité de remplir plus efficacement espaces capillaires (Mehta & Monteiro, 2006).

En plus de contribuer à la silice réactive aux réactions chimiques, les pouzzolanes peuvent également contribuer alumine réactive. Lorsque l'alumine réactive est en présence d'hydroxyde et de sulfate de calciumions, les produits cimentaires tels que C4AH13, AFt et AFm peuvent être formés. Cependant, ces et les propriétés formées dépendent grandement des conditions physiques et chimiques, mélanger proportions et conditions de séchage (Mehta & Monteiro, 2006). **[1]**

I.2.5 Évaluation des pouzzolanes

ASTM C618, Spécification standard pour les cendres volantes de charbon et la pouzzolane naturelle brute ou calcinée pour une utilisation dans le béton a trois classifications, à savoir la classe N, F et C. La classe N est pour le brut ou les pouzzolanes naturelles calcinées, telles que certaines terres de diatomées ; cherts et schistes opalins; tufs et cendres volcaniques ou pumicites, calcinées ou non ; et divers matériaux nécessitant calcinations pour induire des propriétés satisfaisantes, comme certaines argiles et schistes. La classe F est pour voler cendre qui a des propriétés pouzzolaniques et non cimentaires. La classe C est constitué de cendres volantes contenant des particules pouzzolaniques.

Propriétés et certaines propriétés cimentaires. CSA A3000 a une nomenclature similaire à ASTM C618 avec N utilisé pour les pouzzolanes naturelles. ASTM C618 a quatre exigences chimiques qui doivent être respectées lors de l'évaluation d'un projet pouzzolane telle que l'argile bentonite calcinée. Pour répondre aux exigences de la classe N les oxydes SiO2 + A12O3 + Fe2O3 doivent totaliser au moins 70 % des composants. La perte de masse à l'allumage peut aller jusqu'à 10,0 % maximum, c'est la même chose que CSA A3000. La perte de masse à l'allumage selon ASTM C311 est que le matériau est chauffé à 750 ± 50°C dans un creuset en porcelaine et suit le processus de la norme ASTM C114.

La troisième exigence chimique de la norme ASTM C618 est que la teneur maximale en SO3 est de 4,0 %. Alors que La CSA A3000 fixe la teneur maximale en SO3 à 3,0 %. L'exigence chimique finale est de 3,0 % taux d'humidité maximal.

Cependant, la capacité de performance des cendres volantes ou de la pouzzolane naturelle à réagir avec l'hydraulique le ciment dans le béton n'est pas prévu par les exigences chimiques décrites dans la norme ASTM C618, car il aide seulement à décrire la composition et l'uniformité du matériau pouzzolanique.

ASTM C618 décrit les propriétés physiques qui doivent être respectées et d'autres exigences facultatives dans une pouzzolane naturelle, qui comprend les exigences physiques suivantes :

*Finesse

La finesse est la quantité de matière retenue sur un tamis de 45µm (N° 325). La réactivité dans la plupart des cas est directement liée à la finesse du matériau, car les matériaux de base prennent plus de temps à réagir dans les mélanges de béton (Comité ACI 232, 2000). Pour répondre aux exigences de l'ASTM C618 le maximum admissible retenu sur le tamis de 45µm est de 34% et dans CSA A3000 le maximum admissible retenu est de 24% sur le tamis de 45µm.

* Indice d'activité de force L'indice d'activité de résistance n'est pas considéré comme une mesure de la résistance à la compression de la pouzzolane dans le béton, mais de la

résistance de la pouzzolane par rapport à celle du ciment utilisé et la pouzzolane elle-même. Elle ne fournit aucune information sur la proportion optimale de pouzzolane dans béton. L'indice d'activité de résistance est la résistance d'un cube de 50 mm (2 po), en utilisant 80 % de Portland ciment et 20 % de pouzzolane à 7 et 28 jours. La force devrait être de 75% du ciment Portland mélange témoin à 7 et 28 jours pour les cendres volantes et les pouzzolanes naturelles. La CSA A3000 n'établit pas de pourcentage mais exige plutôt que la résistance soit au minimum de 14,5, 20,0 et 26,5 MPa à 3, 7 et 28 jours respectivement.

* Besoin en eau

Pour répondre à la norme ASTM C618, pour les pouzzolanes naturelles, la demande en eau ne peut pas dépasser un maximum de 115 % du mélange témoin. Ceci est basé sur les besoins en eau pour l'indice d'activité de force avec du ciment Portland avec la quantité d'eau nécessaire pour obtenir un débit de ± 5% de la mélange de contrôle.

* Solidité

La solidité est mesurée par l'expansion ou la contraction en autoclave d'une pâte composée de 25 parties pouzzolane et 100 parties de ciment Portland en poids comme indiqué dans la norme ASTM C150. La méthode d'essai pour la solidité est définie dans la norme ASTM C151. Un changement de longueur maximum de 0,8 % est autorisé par ASTM C618 et il est précisé que si la pouzzolane contiendra plus de 20% du matériau cimentaire dans le mélange de projet proposé ; la pâte utilisée pour les essais en autoclave doit contenir le pourcentage prévu de pouzzolane. Ceci est similaire à CSA A3000.

Le test de solidité, réalisé par expansion en autoclave, protège contre l'expansion retardée Cela pourrait se produire si des quantités suffisantes de MgO sont présentes sous forme de périclase ou si CaO est présent sous forme dure. chaux libre calcinée (Comité ACI 232, 2000).

* Limites d'uniformité

Les limites d'uniformité décrites dans la norme ASTM C618 sont spécifiées comme la variation maximale de densité et la finesse dans des limites pratiques pour les expéditions

sur une période de temps. La variation maximale de densité et le pourcentage retenu sur un tamis de 45µm (N° 325) est de 5%. **[1]**

I.3.1Argile bentonite

La bentonite est un minéral argileux abondant dont la composition n'est pas uniforme (Watts, Bilanski, & Menzies, 1986). Le terme de roche bentonite est couramment utilisé pour le nom du minéral smectite qui est composé de plusieurs hydrates de sodium, de calcium, de magnésium, de fer et de lithium aluminium silicates. Les noms des minéraux individuels du groupe comprennent la montmorillonite de sodium, montmorillonite de calcium, saponite (Mg), nontronite (Fe) et hectorite (Li) (Murray, 2007).

Le nom de bentonite a été suggéré à l'origine par Knight en 1898 pour une formation d'argile particulière dans Wyoming, États-Unis. Ross et Shannon (1926) ont fourni la définition suivante pour la bentonite, "la bentonite est une roche composée essentiellement d'un minéral cristallin ressemblant à de l'argile formé par la dévitrification et l'altération chimique qui l'accompagne d'un matériau igné vitreux, généralement un tuf ou cendres volcaniques ». Comme il existe maintenant de nombreuses argiles qui ne proviennent pas de cendres volcaniques ou tuff, Grim et Guven (1978) ont défini le terme bentonite comme une argile composée de minéral à dominante smectite sans distinction d'origine.

La bentonite peut varier en couleur, allant du brun, vert olive au gris bleu et rarement, blanc. Les Bentonites blanches sont plus précieuses et souhaitables pour les applications nécessitant une couleur blanche (Murray, 2007). **[1]**



Figure I.11 : Bentonite Calcinée. **[9]**

I.3.2Calcination de l'argile bentonite

La calcination est l'acte d'un matériau subissant une réaction à haute température par laquelle un solide le matériau se dissocie sous la forme d'un autre solide et d'un gaz (Callister, 2007). Comme argile bentonite la minéralogie peut être très variable, les températures de calcination ont une plage dont elles peuvent varier Grim & Guven (1978) ont généralement décrit les réactions qui se produisent lorsque la smectite est chauffée à hautes températures. Tout d'abord, l'eau interstitielle est perdue lors du chauffage de toutes les argiles à 100 à 150°C. Smectites perdent alors leurs propriétés d'expansion de leur réseau lorsqu'ils sont chauffés à 100 à 300°C. Cette la température dépend de la composition chimique et de la nature du cation échangeable. À entre 450 et 700°C, les smectites perdent l'eau hydroxylée de leur réseau. Cette température précise dépend encore une fois de la composition chimique et de la nature ducation échangeable. Avec les smectites dioctaédriques, comme la montmorillonite, il y a sensiblement pas de retrait et de destruction de la structure du réseau avec la perte d'eau hydroxyle

cependant, pour smectites trioctaédriques, telles que la saponite, l'inverse se produit avec l'élimination de l'hydroxyle l'eau, la structure en treillis est détruite et accompagnée d'un rétrécissement du matériau. La structure du réseau des smectites dioctaédriques est déformée à environ 900°C (Grim & Guven, 1978).

À des températures supérieures à la structure du réseau en cours de destruction, les smectites formeront une variété de nouvelles phases cristallines en fonction de leur composition chimique et de leur structure. La haute température phases s'accompagne de vitrification et de retrait jusqu'à 20% du volume. Pour les riches en fer les smectites la phase de fusion se produit vers 1000°C et les smectites à faible teneur en fer vers 1500°C.

Les variétés riches en fer ont peu ou pas de formation de phase cristalline. De plus « beaucoup, mais pas toutes, les smectites contiennent suffisamment de fer pour produire une couleur de cuisson rouge à brune (Grim & Guven, 1978).

Dans une étude de Taher (2003), l'argile montmorillonite a été chauffée à 200°C, 400°C, 600°C, 800°C, et 900°C et mélangé avec de la chaux et de l'eau pour déterminer l'activation optimale de l'argile température et le rapport chaux/argile. L'argile a d'abord été mélangée à de la chaux selon un rapport argile/chaux de 90:10, 80:20, 70:30 et 60:40. Ensuite, de l'éthanol a été ajoutée pour obtenir une homogénéité complète dans les mélanges. Après séchage des échantillons pendant une nuit à 105°C, de l'eau a été ajoutée aux mélanges à rapports eau/solide de 0,5, 0,6 et 0,7 en poids et placés dans des moules cylindriques (3,14 cm2 section transversale de 2 cm de hauteur). Les spécimens produits ont été durcis dans un autoclave à dix atmosphères pendant 2, 6, 12 et 24 heures. Le MEB a été utilisé pour étudier la morphologie et la microstructure de la pâte. Les résultats obtenus à partir de l'étude ont montré que l'argile avait une température de traitement thermique optimale de 1000°C avec un mélange optimal de 80% de montmorillonite et 20 % de chaux. **[1]**

I.3.3 Historique de l'argile bentonite dans les mélanges de liants

L'utilisation d'argile bentonite dans les mélanges de liants est rare dans l'industrie du béton. Il y a deux manières qu'il peut être utilisé dans le mélange de liant.

Le premier étant un ajout en petites quantités de 1 à 2 % de ciment Portland en poids pour améliorer la maniabilité, réduire la ségrégation des agrégats et améliorer l'imperméabilité (Grim & Guven, 1978).

La deuxième utilisation de l'argile bentonite dans les mélanges de liants est comme pouzzolane une fois qu'elle est calcinée pour améliorer la réactivité de la pouzzolane. Le Bureau of Reclamation des États-Unis a mené des études dans le 1950 pour rechercher quelle pouzzolane utiliser dans le barrage Ashley (maintenant le barrage de Flaming Gorge).

Le Bureau a décidé d'utiliser un barrage-voûte en béton, figure 2.5, avec de la montmorillonite calcinée comme une pouzzolane sur la Green River (Bureau of Reclamation, 1968).

Le barrage est une structure en béton à voûte mince d'une hauteur de 153 m et mesure 391,7 m de longueur à la crête de la chaussée. Le barrage de Flaming Gorge contient 754 310 m3 de béton de masse.

Le béton a été mis en place pour la première fois en 1960 et terminé en 1963 (Bureau of Reclamation, 1976). Une photo du barrage est montrée à la Figure 2.5. La montmorillonite calcinée a été sélectionnée pour la projet en remplacement partiel du ciment Portland en raison de la température d'hydratation plus basse, coefficient de dilatation gérable, supérieur à la résistance requise pour le projet et inférieur que les besoins en eau habituels lors de la comparaison avec les alternatives étudiées par le Bureau of Remise en état (Bureau de remise en état, 1965).**[1]**

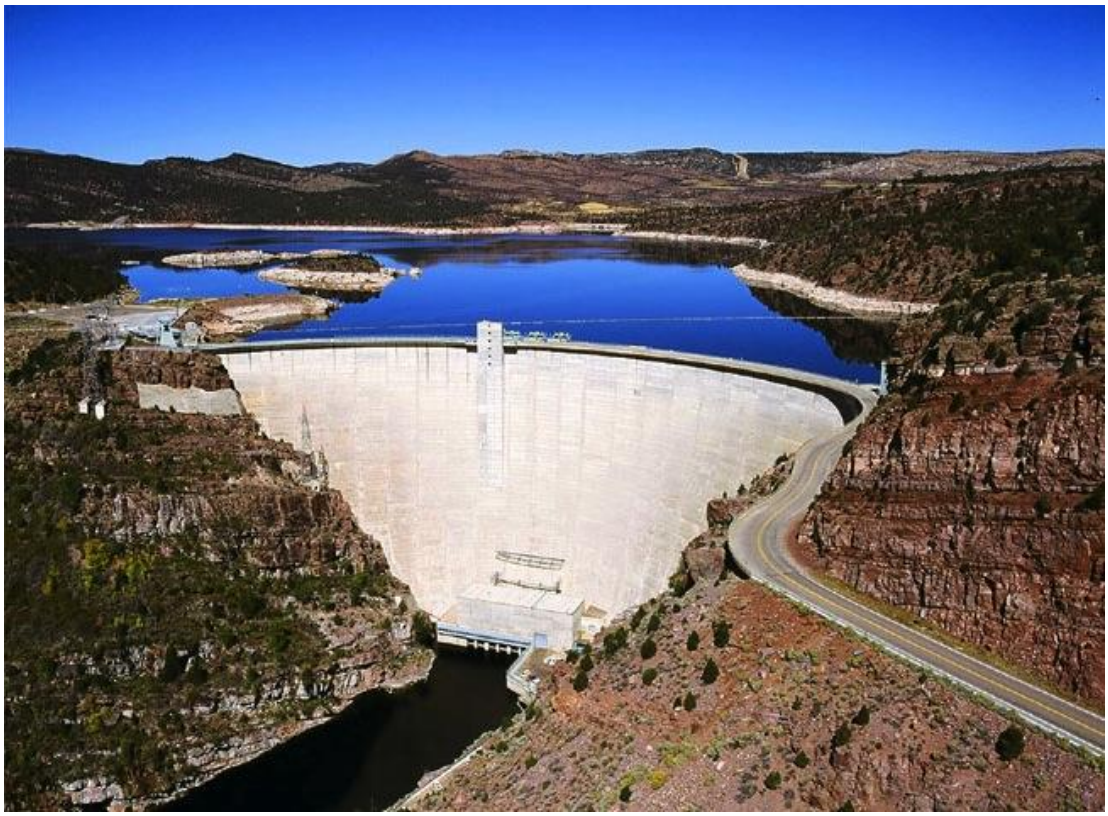


Figure I.12 : barrage de Flaming Gorge. **[10]**

Le béton de masse du barrage de Flaming Gorge a été classé en trois sections, à savoir l'intérieur béton contenant de la pouzzolane, le béton extérieur contenant de la pouzzolane et l'extérieur béton sans pouzzolane. En raison des exigences de durabilité de l'extérieur en aval et de la face extérieure en amont au-dessus de 1478,3 m d'altitude, aucune pouzzolane n'a été utilisée ; cependant, supplémentaires Le ciment Portland a été utilisé pour augmenter la durabilité (Bureau of Reclamation, 1976). La pouzzolane utilisé dans le barrage de Flaming Gorge était de l'argile montmorillonite calcinée de Laramie Wyoming (Bureau de Réclamation, 1965).

Le ciment utilisé dans la partie intérieure a été remplacé à 30 % par de l'argile montmorillonite calcinée, et le ciment dans le ciment extérieur avait un remplacement de 25 %.

Tout le béton de masse du barrage contenait du ciment Portland à faible teneur en alcali avec 1 % de calcium chlorure en poids du ciment. Lorsque la température moyenne de l'air tombe en dessous de 4,4 °C, un adjuvant entraîneur a été ajouté au mélange de béton.

Le Bureau of Réclamation des États-Unis a effectué des tests sur le béton à 6 mois et 1, 3,5 et 10 ans après l'achèvement du barrage. Le Bureau a carotté le barrage à chaque intervalle et a trouvé que l'état général du béton du barrage de Flaming Gorge après 10 ans de service était très bon... (Bureau of Réclamation, 1976). Dans la figure 2.6, le test de résistance à la compression les résultats sont présentés pour le barrage. Uniquement béton de masse intérieur avec pouzzolane et masse extérieure béton sans pouzzolane ont été testés. Le béton de masse intérieur était moins résistant que le béton de masse extérieur sans pouzzolane ; cependant, il a continué à se renforcer jusqu'à la cinquième année de service avec un gain de force important entre les années 3 et 5. **[1]**

I.3.4 Composition du la bentonite

Chemical composition	Bentonite
SiO_2 (%)	61.28
Al_2O_3 (%)	17.79
Fe_2O_3 (%)	3.01
CaO (%)	4.54
Na_2O (%)	2.70
MgO (%)	2.10
K_2O (%)	1.24

Figure I.13 : Composition chimique de la bentonite. **[11]**

I.3.5 Types de bentonite

Il existe trois types de bentonites :

- **Bentonite calcique**

Elles constituent la plus grande part de gisements exploités dans le monde. Elles contiennent essentiellement des ions (Ca2+) en position inter foliaire. Ces argiles présentent un taux de gonflement de 3 à 7 fois le volume initial. **[13]**

- **Bentonite sodique**

Ce sont des argiles rares. Leur ion inter foliaire ou échangeable est Na+. Elles ont un pouvoir de gonflement très élevé (12 à 18 fois). **[13]**

- **Bentonite de potassium**

Aussi connu sous le nom de bentonite de potasse ou de K bentonite, la bentonite de potassium est une argile illitique riche en potassium formée à partir d'une altération des cendres volcaniques. **[13]**



Figure I.14 : Les types de bentonite **[12]**

I.3.6Utilisations de la bentonite

La bentonite est l'argile industrielle la plus importante en raison de son principal composant de montmorillonite qui lui confère une capacité d'absorption et de gonflement très élevées qui sont exploités dans différents domaines dont: **[13]**

• Protection environnementale.

• Forage.

• Les céramiques.

• Les peintures.

• L'agroalimentaire.

• Décoloration des huiles.

• Raffinage du pétrole.

• Additif dans la fabrication du papier.

• Génie civil (additif dans le ciment).

• Traitement des eaux usées.

• La pharmacie et la cosmétique.

Les bentonites sont largement utilisées dans l'industrie cosmétique et pharmaceutique en tant qu'excipient, ingrédients actifs et transporteur et libérateurs d'ingrédients actifs [28, 29], comme décrit plus en détail dans le titre suivant.

I.3.7Propriété des bentonites

- Propriétés physiques

Forme naturelle et finesse des particules Sous sa forme brute naturelle, la bentonite est une roche tendre Ayant à peu près la consistance du kaolin c'est-à-dire friable et onctueuse, happant fortement au lange, blanc ou Légèrement teintée de jeune, de beige, de jeune verdâtre, de rose. Son grain est extrêmement fin.

- Poids spécifique

Les poids spécifique à sec de la bentonite varie sont les quantités et origines dans de faibles proportions et va de 2.7 à 2.8.Le poids spécifique apparent des produits broyés est sensiblement inférieur et de l'ordre de 1.6 à 1.8.

- Gonflement

L'une des propriétés les plus remarquables de la bentonite est sa faculté de gonfler considérablement dans l'eau pour former des masses gélatineuses.

- Viscosité

La viscosité est évidemment un caractère très important, scientifiquement et techniquement des gels et suspensions de bentonite.

- Absorption d'eau (capillaire)

En raison de la grande finesse des particules autrement dit de sa très grande surface utile de contact la bentonite est dotée d'un grand pouvoir absorbant.

Ross et Shannon ,1926 ont dit en parlant de la bentonite de Wyoming que cette heureuse combinaison de large surface et de texture perméable donne à la bentonite le plus grand pouvoir d'absorption que la nature semble avoir jamais conféré.

Scientifiquement l'adsorption dans les solutions colloïdales à grande surface de contact est un phénomène complexe rapporté à la fixation d'ions par les granules colloïdales joue un rôle important dans les phénomènes ultérieurs et particulièrement dans les variations de stabilité provoquées par l'adjonction de faibles quantités d'électrolytes dans la floculation. **[13]**

- Propriétés chimiques

- Composition

Pour un produit du genre de la bentonite les essais physique et l'analyse minéralogiques présentent généralement un intérêt plus direct que l'analyse chimique portant celle-ci permet de fixer les impuretés et les bases présentes. Ainsi la teneur en fer permet dans certaine mesure d'exploiter la teinte des produits. Quant aux bases, elles jouent un rôle très important que nous aurons à étudier ultérieurement. Les bentonites ont chimiquement, des teneurs qui permettent les rapporter à la montmorillonite : SiO2. Al2O3. Fe2O3. Ca O. Go. K2O. Na2O. So3

- La calcination des argiles

La calcination est une technique de préparation d'échantillon effectuée en présence d'air sur une matière. Elle est utilisée en métallurgie pour la transformation des métaux en toutes sortes de dérivés, ou pour la transformation du calcaire en chaux. Cette technique provoque des réactions physiques et/ou chimiques et met ainsi l'échantillon dans un état de référence. **[13]**

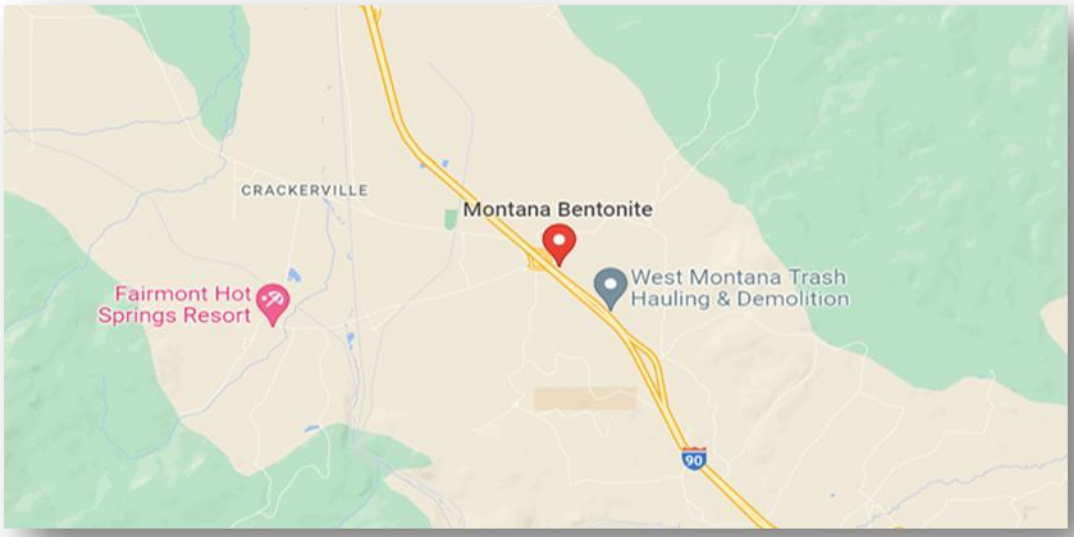
I.3.8Trouve la bentonite

La bentonite est une argile colloïdale qui est principalement extraite dans des carrières situées dans des régions riches en dépôts de cendres volcaniques ou en roches sédimentaires. Elle est souvent trouvée dans des zones géologiques telles que les lits de la mer, les volcans éteints ou les bassins sédimentaires.

La bentonite est disponible dans de nombreuses régions du monde, notamment aux États-Unis (dans des États tels que le Wyoming, le Montana et le Dakota du Sud), au Brésil, en Chine, en Inde, en Grèce, en Turquie, en Italie, en Russie, en Australie et en Afrique du Sud.



Figure I.15 : Bentonite en Italie. **[14]**



FigureI.16: Bentonite en Montana. **[15]**

CHAPITRE II

Matériaux et essais

II.1Introduction

Ce chapitre a pour objectif de présente les différents matériaux et les techniques expérimentales utilisées dans notre étude. On présenter en premier partie les caractéristiques et les propriétés des matériaux de bas utilise dans la composition du mortier et du béton.

Dans une seconde partie, on exposera la méthode de formulation adoptée dans les différentes compositions du béton de sable. Ensuite, on présente les essais réalisés au cours de notre investigation sur les mortiers et les composites obtenus à l'état durci, les différents essais faits au cours de ce travail sont :

- **État durci**

  -La résistance à la comprenions

  -La résistance à la traction

  -Porosité accessible à l'eau

  -Absorption d'eau par immersion

  -Absorption d'eau capillarité

  -Résistance au feu

  -La résistance aux milieux acide

II.2 Caractérisation des matériaux utilisés

Pour la confection du béton, Nous avons utilisé des matériaux locaux de la wilaya de Médéa sont caractérisés expérimentalement au laboratoire de génie civil tout en assurant les recommandations des normes en vigueur.

II.2.1Ciment

Le ciment utilisé est CPJ-CEM II/A (Mâtine) Figure II.1est un ciment Portland artificiel dont la résistance minimale à la compression à 28 jours est de 42,5 MPa, produit par la cimenterie de LAFARGE dont l'ajout est le calcaire qui est conforme à la norme [NA442.Le tableau

II.1résume l'Analyse chimique du ciment et composition hypothétique du clinker, selon la fiche technique < annexe >du ciment.



Figure II.1 : Le ciment utilisé

Tableau II.1 : L'analyse chimique du ciment et composition du clinker

Analyse chimique Du ciment	Perte au feu (%) (NA 5042) 7.00-9.50	7.00-9.50
	Résidus insolubles (%) (NA 5042)	1.50-3.00
	Teneur en sulfates SO3 (%) (NA 5042)	2.00-2.50
	Teneur en sulfates SO3 (%) (NA 5042)	1.90-2.30
	Teneur en chlorures (%) (NA 5042)	0.01-0.03
Composition hypothétique du clinker	Silicates tricalciques C3S (%)	58.00-64.00
	Aluminates tricalciques C3A (%)	6.00-8.00

II.2.2 Granulats

II.2.2.1 Sable

Nous avons utilisé un sable de (Ouedi sauf) et leurs Propriétés physiques sont représentées dans le tableau II.2 .et la figure II.3 représente la courbe granulométrique de sable utilisés.



Figure II.2 : Sable moyenne d'Ouedi sauf

Tableau II.2 : Propriétés physiques d'identification de sable utilisé

Caractéristiques	Sable
Provenance	Ouedi sauf
Classe granulaire	0/3
Module de finesse	2.07
Masse volumique absolue (g/cm3)	2.63
Masse volumique apparent (g/cm3)	1.48
Équivalent de sable (%)	81.16
Taux d'absorption d'eau (%)	0.2

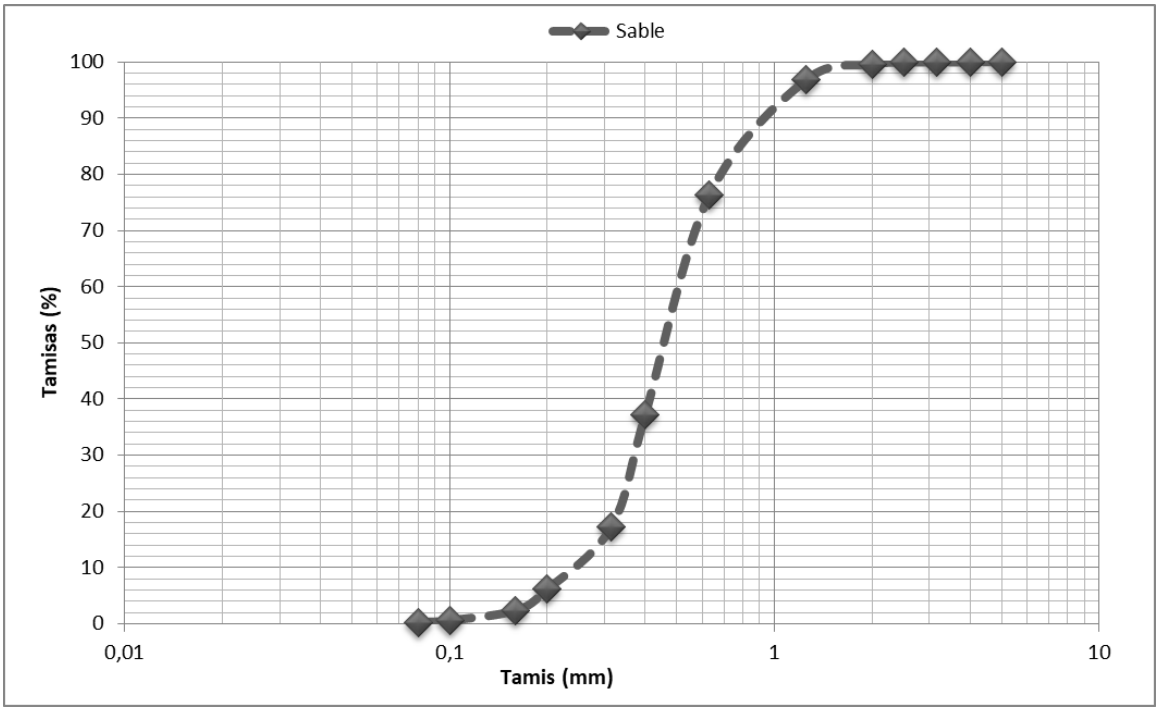


Figure II.3 : Courbe granulométrique du sable utilisée

II.2.2.2Bentonite

La bentonite utilisée est une bentonite issue de l'ouest Algérien. C'est une bentonite calcique beige, qui provient de la région de Maghnia qui se trouve dans la wilaya de Tlemcen.



Figure II.4 : la bentonite

II.2.2.2.a caractérisation de la bentonite

Bentonite est caractérisé suivant les normes en vigueurs, voire les procédures des essais qu'on a réalisées sur ce poudre, les résultats sont représentés dans le tableau II.3.

Tableau II.3 : Propriétés physiques de bentonite

Caractéristiques	Bentonite
Classe granulaire	0/3
Surface spécifique (cm^2/g)	4371
Masse volumique absolue (g/cm3)	2.52

II.2.3 Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée pour la confection des bétons est celle du robinet considérée Comme potable, exempte de toute impureté nuisible au béton et conforme à la norme [NF EN - 1008]. Sa température est comprise entre 18 et 20°C.

II.2.4 Adjuvent

Un seul type d'adjuvants ont été utilisés dans notre étude, appelée : TEMPO-10 est un super plastifiant haut réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération non chloré, à base de copolymère.



Figure II.5 : Adjuvant utilisé TOMPO-10

II.2.5Formulation et Composition des mortiers

Les mortiers sont fabriqués à bas des granulats sable et ciment et argile bentonite et avec un rapport E/C variable pour obtenir une ouvrabilité plastique. Les compositions des mortiers obtenus soit par substitution soit par ajout bentonite respectivement dans les tableaux II.4, II.5.

Tableau II.4 : Compositions des mortiers confectionnés(a)

Désignation Du mortier	Addition (g)	Ciment (g)	Sable (g)	Eau (g)	Super plastifiant (g)	Nombre de calcination
M0	0	450	1350	225	0	600°
M10	45	405	1350	235	9	600°
M20	90	360	1350	240	9	600°
M30	135	315	1350	244	9	600°
M40	179	271	1350	245	9	600°

Tableau II.5 : Compositions des mortiers confectionnés(b)

Désignation Du mortier	Addition (g)	Ciment (g)	Sable (g)	Eau (g)	Super plastifiant (g)	Nombre de calcination
0	0	450	1350	225	0	600°
200	90	360	1350	190	9	200°
400	90	360	1350	190	9	400°
800	90	360	1350	190	9	800°
900	90	360	1350	190	9	900°

II.6 Préparation des mélanges

Tous les mélanges sont préparés dans les mêmes conditions dans une salle maintenue à une température de 20°C ± 2C° et à une humidité relative supérieure ou égale à 50%. Le mélange doit être effectué par malaxage pendant 4 minutes conformément aux prescriptions de la norme [EN 196-1], au moyen du malaxeur spécifié par la norme [NF P 15-411], selon la procédure suivante :

- **Préparation**

- La pale du malaxeur doit être réglée à 4.5 mm du bol figure II.6.

- Pour les premiers mélanges, il est conseillé de mouiller le récipient du malaxeur puis de l'essuyer afin qu'il présente la même humidité que les gâchées courantes.

- **Malaxage**

- introduire l'eau en premier dans la cuve du malaxeur ; y verser ensuite le ciment ; aussitôt après, mettre le malaxeur en marche à vitesse lente.

- après 30 s de malaxage introduire régulièrement le sable déjà préparé pendant les 30 s suivantes. Mettre alors le malaxeur à sa vitesse lente et continuer le malaxage pendant 30s supplémentaires.

- arrêter le malaxeur pendant 1 min 30 s. Pendant les 15 premières secondes, racler les bords du récipient.

- rependre ensuite le malaxage à grande vitesse pendant 60s. Ces opérations de malaxage sont récapitulées dans le tableau après :

Tableau II.6 : Récapitulation des opérations de malaxage

Operations	Introduction de l'eau	Introduction de ciment		Introduction du sable		Raclage de la cuve		
Durée des operations			30s	30s	30s	15s	1 min 15s	60s
Etat du malaxeur	Arrêt		Vitesse lente		Vitesse rapide	Arrête		Vitesse rapide



Figure II.6 : Le malaxeur utilisé

II.7 Les essais sur le béton

II.7.1 État durci

II.7.1.1 Essai de la résistance à la traction par flexion

À l´âge requis, les éprouvettes sont brisées par flexion en deux moitiés selon la norme [EN196-1]. C'est l'essai le plus couramment utilisé. Il consiste à rompre en flexion (Par trois points), une éprouvette prismatique (4x4x16) cm de côté a et de longueur L. La figure II.7montre les étapes de l'essai.

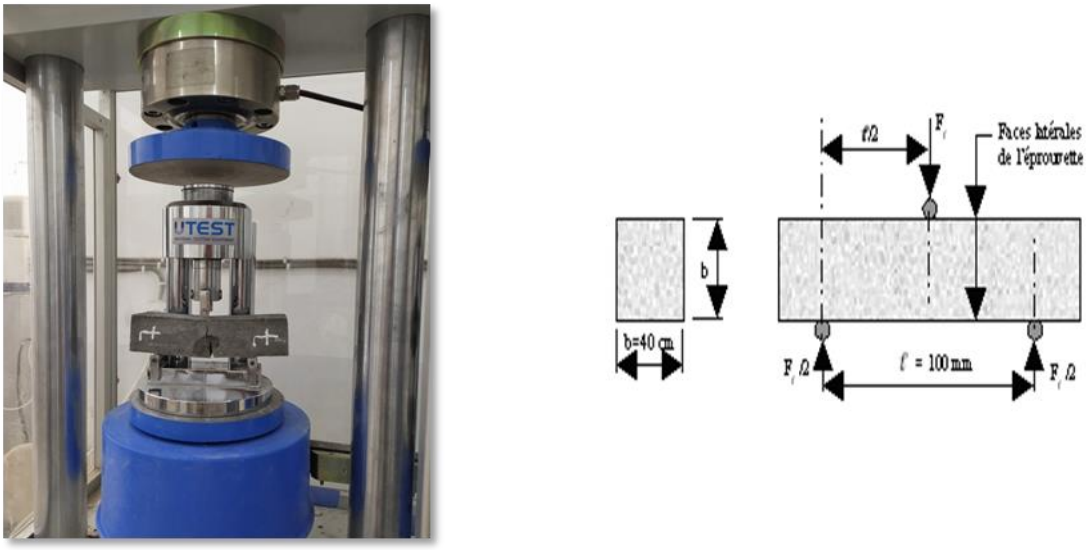


Figure II.7 : Essai de traction par flexion sur éprouvette de béton

II.7.1.2 Essai de la résistance à la compression

La résistance à la compression a été mesurée selon la norme [EN 196-1] par compression axiale pour d'éprouvettes cubique à l'âge de 7 et 28 jours, à l'aide d'une presse de capacité de 2000 KN .La résistance à la compression correspond à la contrainte moyenne d'écrasement de trois (3) d'éprouvettes cubique (4x4x4) cm. La figure [II.8] montre les étapes de l'essai.

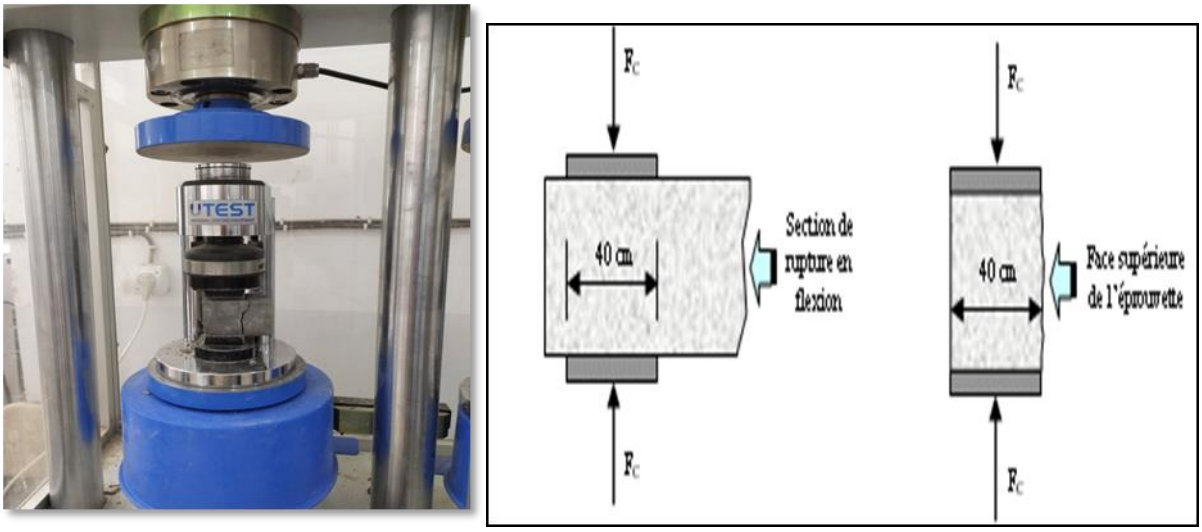


Figure II.8 : Essai de compression sur éprouvette béton

II.7.1.3 Absorption d'eau par capillarité

Dans cet essai, on prend un morceau d'éprouvette de béton de sable déjà utilisé puis sécher. On le pesé (m0) au début, après on l'introduire dans un bac remplit d'un film d'eau (5mm d'eau) FigureII.9, et pendant chaque intervalle de temps (0min,6 min,12 min, 30 min ,1 h, 2h ,4h ,24h,48h ,72h ,96h,144h,168h) on remesure les morceaux (m1), le différent de poids entre m1 et m0c'est le poids de l'eau absorbé (m1- m0) [NBN NE 13057].

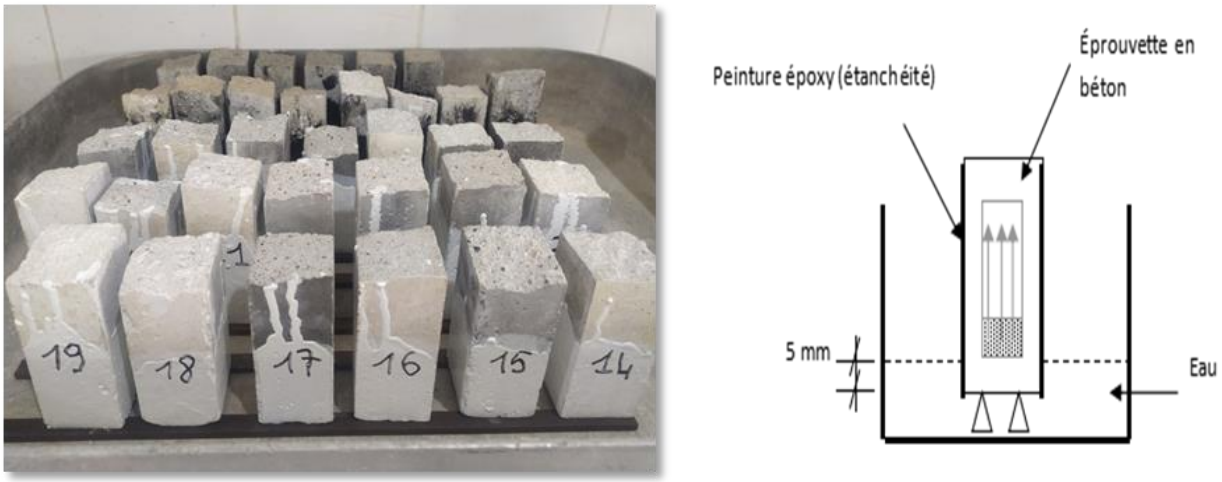


Figure II.9 : Essai de l'absorption d'eau par capillarité

II.7.1.4 Absorption d'eau par immersion

L'absorption d'eau par immersion est donc le résultat des mouvements capillaires dans les pores du béton qui sont ouverts sur le milieu ambiant. Elle est déterminée par immersion d'une éprouvette de béton dans l'eau jusque 24 h jusqu'à masse constante et en mesurant l'augmentation de masse. En utilisé équation suivent :

$$\mathbf{Abs= ((M_{humide}-M_{sec})/M_{sec})\times 100}$$



Figure II.10 : Essai de l'absorption d'eau par immersion

II.7.1.5 Porosité accessible à l'eau

La porosité accessible à l'eau [NF EN 18-459] a été mesurée selon la recommandation de l'AFPC AFREM. Les échantillons ont d'abord été séchés dans une étuve à 100 °C, jusqu'à stabilisation de la masse ($\mathbf{M_{sec}}$), 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 ($\mathbf{M_{eau}}$) et dans l'air ($\mathbf{M_{air}}$). La porosité totale ($\boldsymbol{\varepsilon\%}$) a été calculée en utilisant l'équation :

$$\boldsymbol{\varepsilon}(\%) = \frac{\mathbf{M_{air}} - \mathbf{M_{sec}}}{\mathbf{M_{air}} - \mathbf{M_{eau}}} \times \mathbf{100}$$



Figure II.11 : Essai de porosité accessible à l'eau

II.7.1.6 Résistance au feu

Cet essai consiste à préparer des demi prismes d'éprouvettes (4×4×16 cm³) pour le traitement Thermique, elles sont exposées à l'air libre au laboratoire pendant 6 jours puis étuvées à 105°Cpendant plusieurs jours jusqu'à stabilisation de leurs masses. Ensuite, elles sont chauffées dans un four à moufle Figure II.12 à 600°C avec une vitesse de chauffage égale à 10°C/min maintenues la température constante dans le four pendant une heure conformément à la norme [ISO 834]. Tous les demi-prismes d'éprouvettes sont ensuite refroidis à l'air (en dehors du four)

pendant 24 heures puis écrasés. Pour chaque température, des mesures de pertes de masse ont été effectuées. Le degré de déshydratation (Perte de masse (%)) est évalué par la relation suivante :

$$\textbf{Pert de masse} = \frac{\mathbf{M_1 - M_2}}{\mathbf{M_1}} \times \mathbf{100}$$

Avec M1, M2 les masses des éprouvettes avant et après le chauffage respectivement.



Figure II.12 : Résistance au feu

II.7.1.7 Essai de résistances à l'acide

Les éprouvettes (4 x4 x16) cm² sont conservées dans l'eau à 20°C pendant 90 jours avant d'être soumises à l'immersion dans des bacs en plastique contenant soit une solution de 34% de acide chlorhydrique (HCL) dans les conditions du laboratoire, les bacs en plastique utilisés ont avec la solution en FigureII.13.



Figure II.13 : acide utilise

CHAPITRE III

Résultats et interprétation

III.1 Introduction

Ce chapitre présente les résultats et discussions de la valorisation de la bentonite calcinée pour formulation. Il s'agit d'étudier l'influence de cette bentonite calcinée sur les caractéristiques physico-mécaniques et sur la durabilité de ce mortier.

D'abord, nous allons inspecter et suivre le développement de la réactivité des bentonites utilisées avant et après le traitement, en vue de fouiller le meilleur cycle thermique qui se qualifie ces argiles.

Ensuite nous nous intéressons se bien comprendre les raisons menant à l'évolution des différentes propriétés fraiches et durcies des mortiers contenant ces artificielles, en quantifiant le dosage optimal de substitution par rapport au ciment pour avoir un bon mélange de tous les aspects.

III.2 Propriétés à l'état durci des mortiers de bentonite

III.2.1Densité

Les résultats de la densité des différents mortiers réalisés sont résumés dans la figure III.1, III.2 :

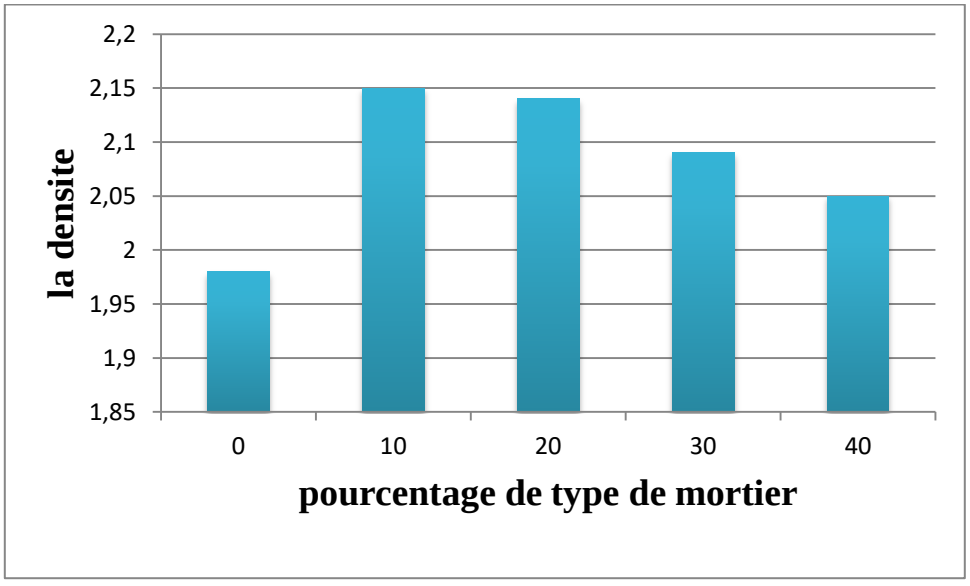


Figure III.1 : Variation de la densité de chaque type de mortier(a)

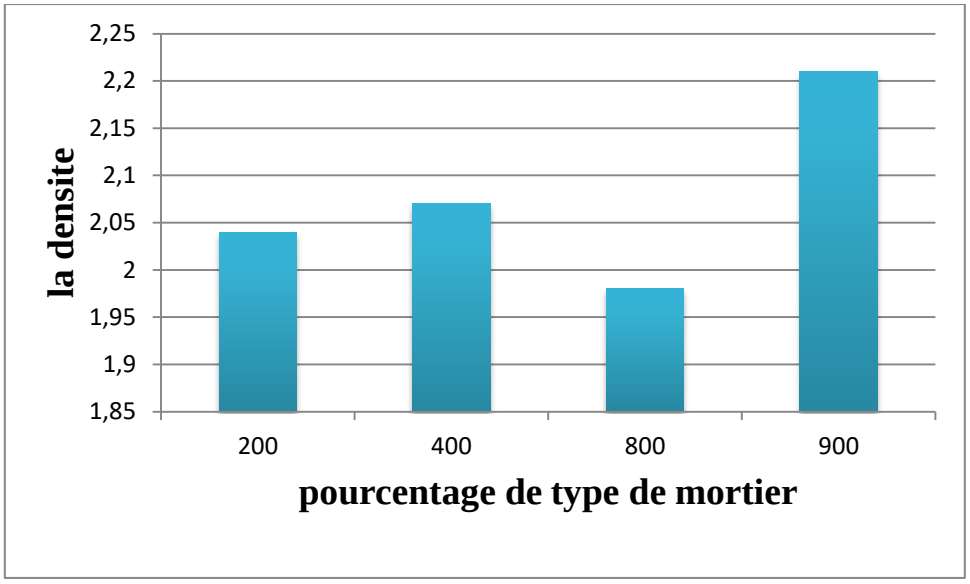


Figure III.2 : Variation de la densité de chaque type de mortier(b)

La densité à l'état durci de différents mélanges est représentée sur les figures III.1, III.2 Les résultats Obtenus montrent que la densité maximale des mélanges élaborés, cette valeur concerne le mortier Témoin fabriqué en utilisant uniquement le ciment. En outre, la densité des mélangés tend à diminuer Avec l'augmentation de taux de substitution des B ce qui conduit à une réduction de la densité Globale des matrices. Et ont également fait des observations Similaires au résultat des densités des mortiers base des bentonites.

III.2.2Résistance mécanique

Les figures III.3, III.4 présente la résistance à la compression et à la flexion de différents mortier à base de bentonite en utilisés à 28jour.

- **La Résistance à la traction**

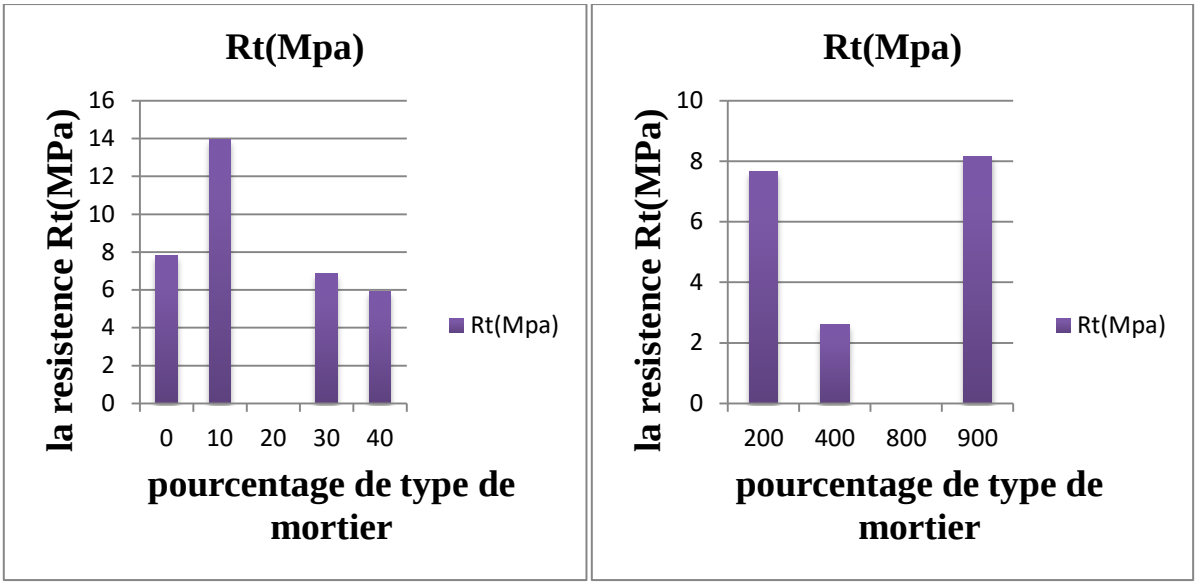


Figure III.3 : la résistance à la flexion du mortier(a)

L'analyse des résultats de la Figure III.3permet d'apporter les commentaires suivants : Les résistances de tous les mortiers distribuent aléatoire a se pourcentages de type du mortier alors la résistance à la traction augmente au début de lissai et ce démines à la fin. La diminution de la résistance à cause de l'augmentation du pourcentage de la bentonite ce caractérise à base de l'absorption.

- La Résistance à la compression

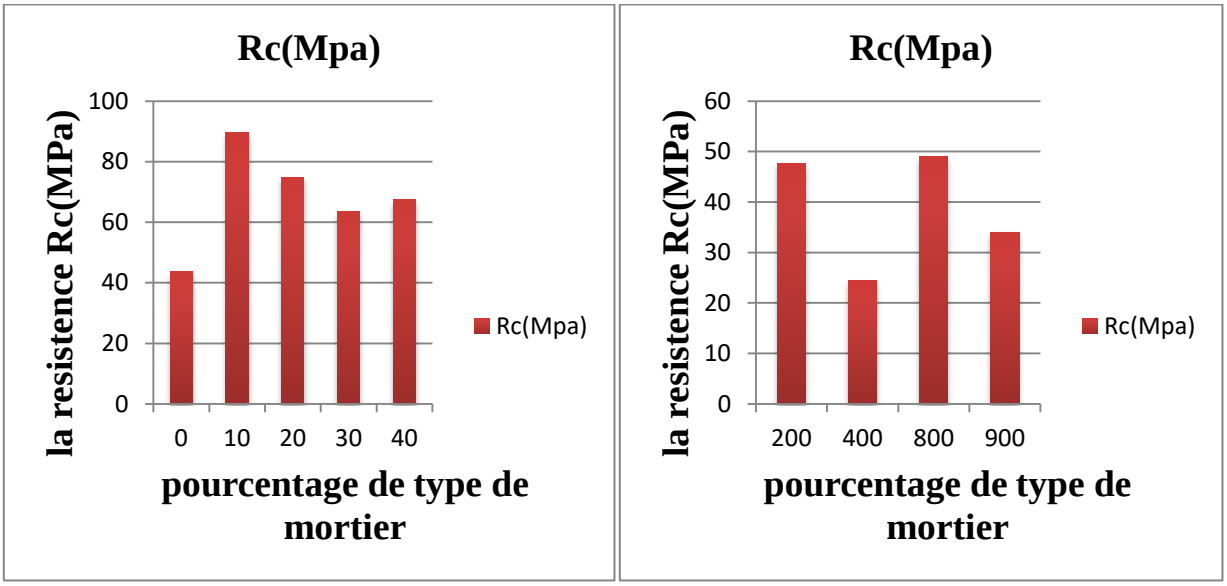


Figure III.4 : la résistance à la compression du mortier(b)

L'analyse des résultats de la Figure III.4 permet d'apporter les commentaires suivants : Les résistances de tous les mortiers distribuent aléatoire a se pourcentages de type du mortier alors la résistance à la compression augmente au début de lissai et ce démines à la fin. La diminution de la résistance à cause de l'augmentation du pourcentage de la bentonite ce caractérise à base de l'absorption.

III.2.3Absorption par immersion

Les résultats de l'essai absorption d'eau des différents mortiers réalisés sont résumés dans les figures III.5, III.6 :

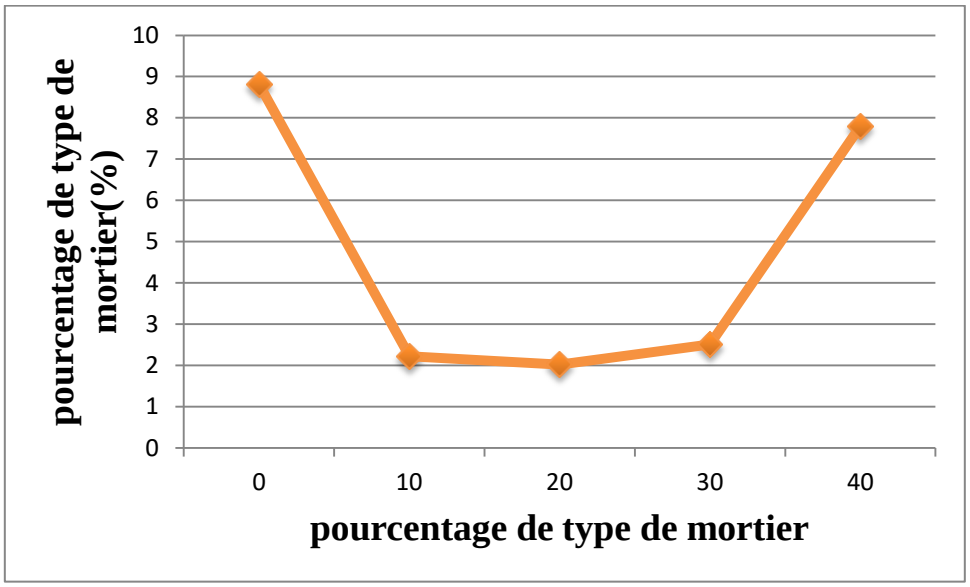


Figure III.5 : absorption de chaque type du mortier (a)

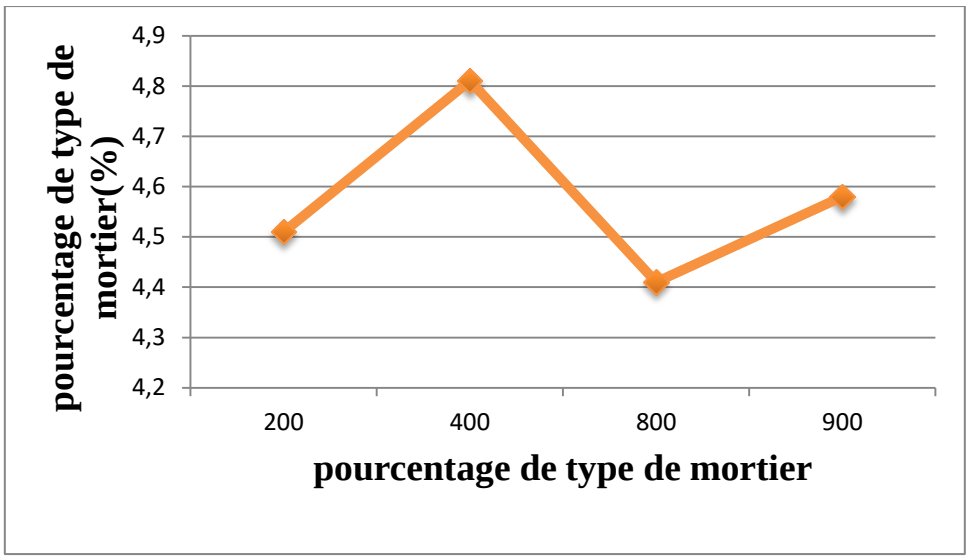


Figure III.6 : absorption de chaque type du mortier(b)

D'après les figures III.5, III6 on remarque que mortier témoin absorbe plus d'eau légèrement par rapport au le mortier à base de bentonite. Ce comportement est attendu à cause des bentonites fines de l'ajout.

III.2.4Porosité accessible au l'eau

Les résultats de l'essai Porosité accessible à l'eau des différents mortiers réalisés sont résumés dans les figures III.7, III.8 :

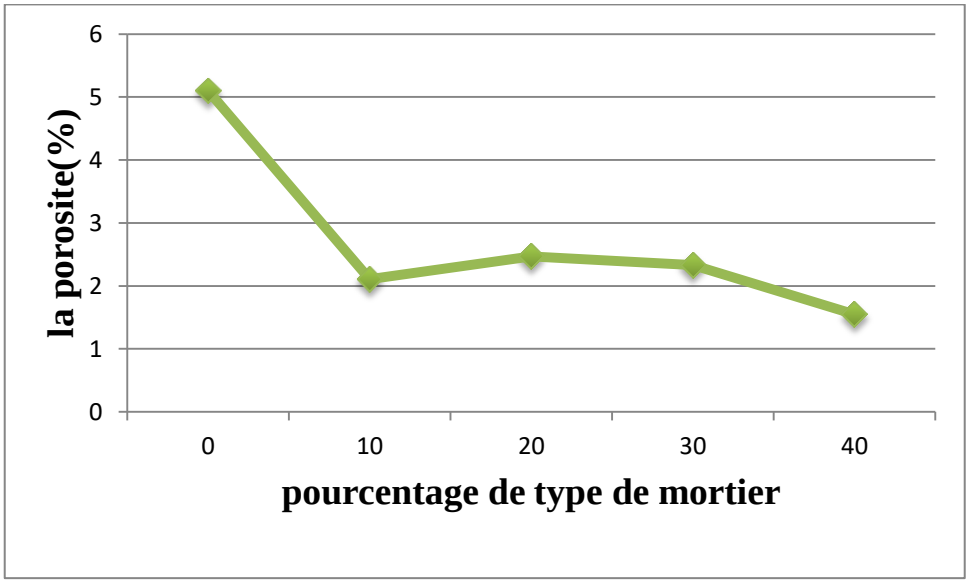


Figure III.7 : porosité de chaque type du mortier(a)

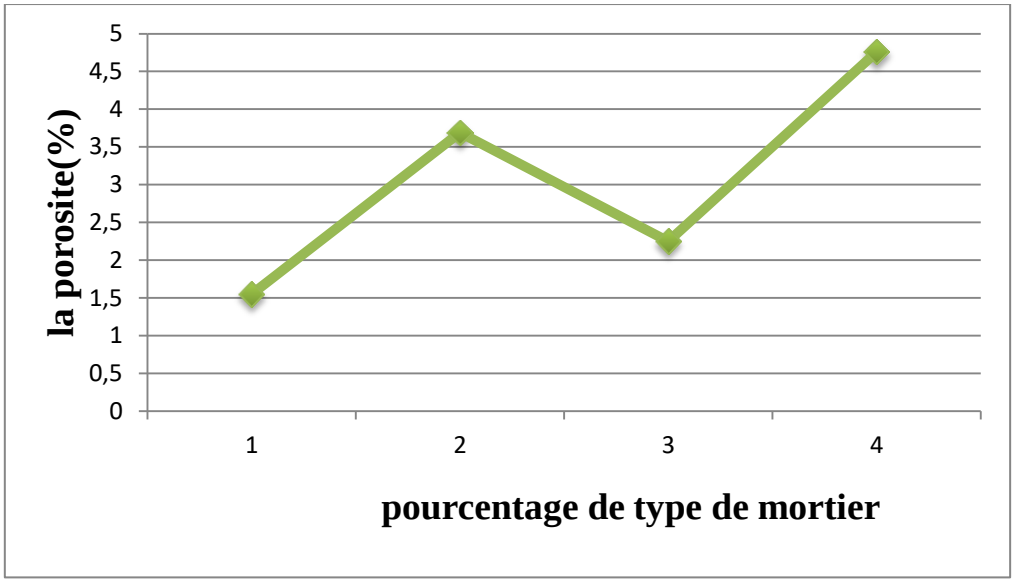


Figure III.8 : porosité de chaque type du mortier(b)

Les figures III.7, III.8. Présente l'évolution de la porosité accessible à l'eau de différents mélanges de mortier à 28 jours en fonction des pourcentages. D'après cette figure, les valeurs de porosité varient entre 1 et 5%. L'incorporation de bentonite jusqu'à 10, 20, 30, 40, 200, 400, 800,900 respectivement, a donnée des valeurs de porosité inférieures que celles de mortier sont bentonite à témoin 0. Ceci est attribué au rôle de remplissage de la Bentonite, où les grains remplissent le système poreux, grâce à leur taille plus fines que le ciment.

III.2.5Résistance au fau

- **Pert de masse**

  Les résultats de la perte de masse des éprouvettes à (0, 10, 20, 30, 40, 200, 400, 800, 900%) chauffées à 600°C sont représentés sur les figures ci-dessous :

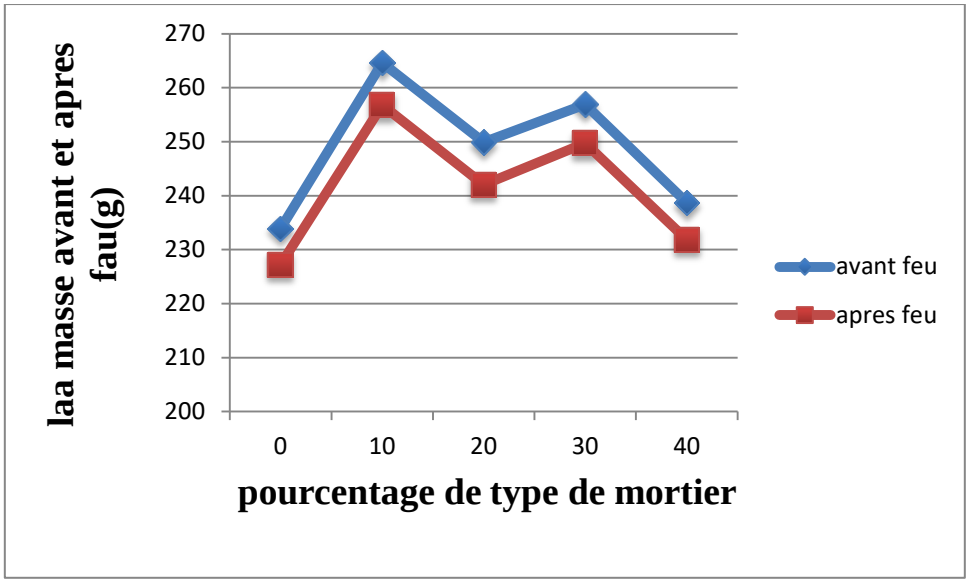


Figure III.9 : perte de masse avent et après fau(a)

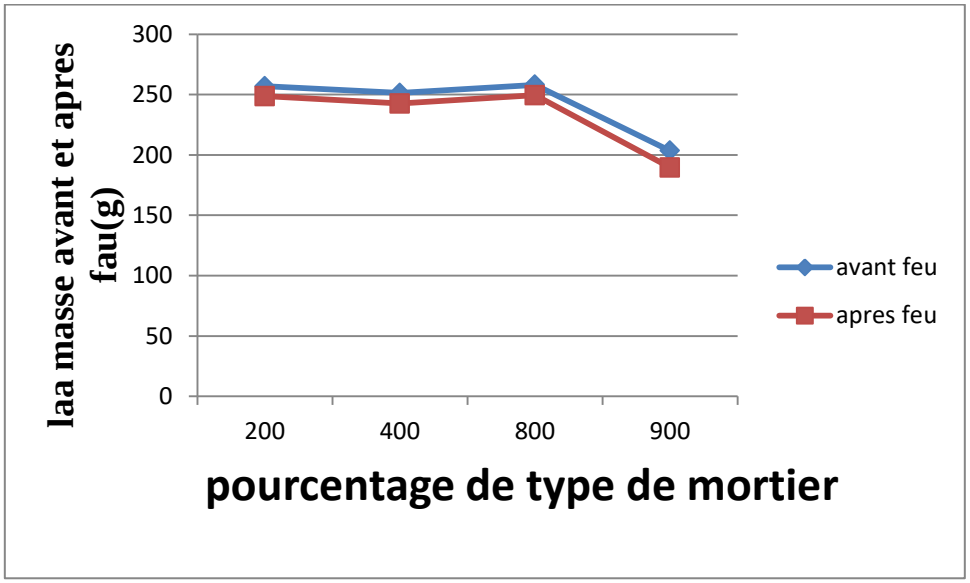


Figure III.10 : perte de masse avent et après fau(b)

- **Résistance à la compression**

  Les résultats de la résistance à la compression des éprouvettes chauffées à 600C ° sont représentés sur les figures III.11, III.12 et les tableau.III.1, III.2 suivante :

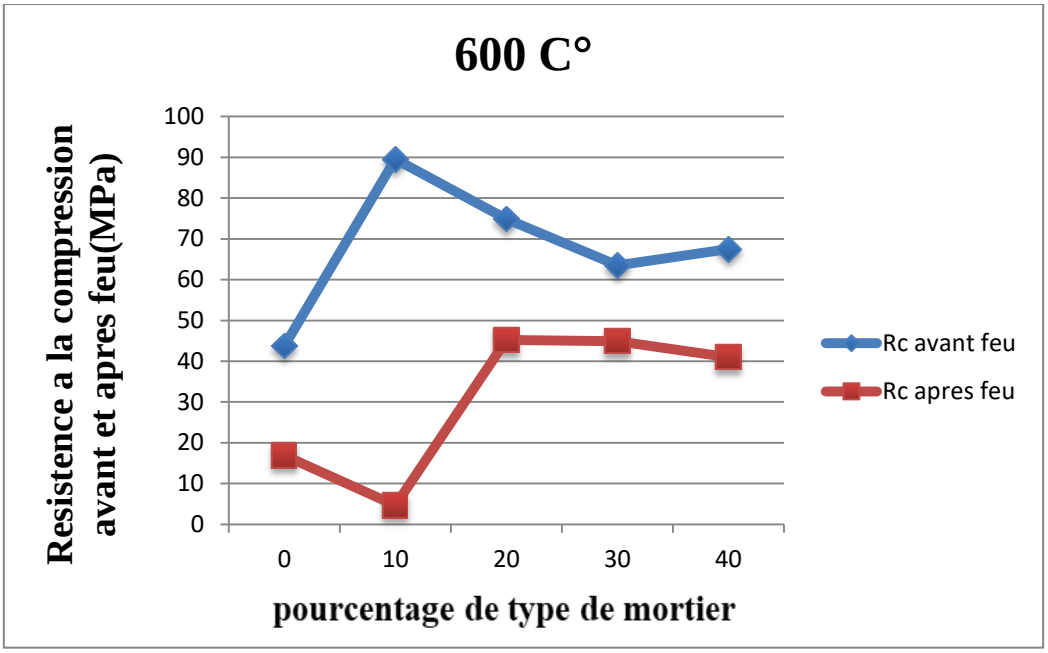


Figure III.11 : la résistance avent et après chauffes(a)

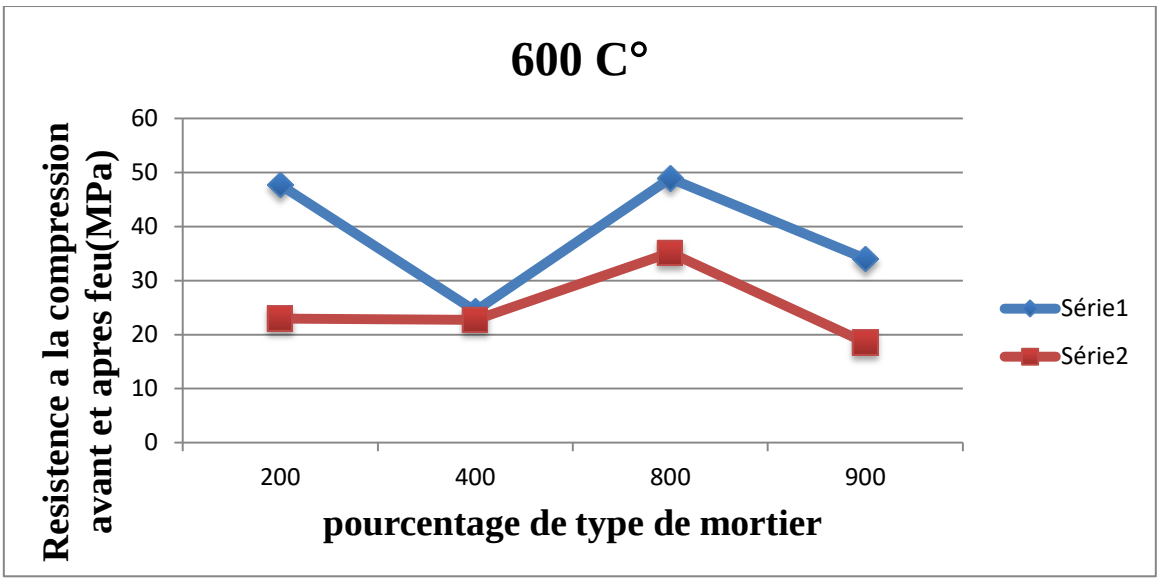


Figure III.12 : la résistance avent et après chauffes(b)

Tableau III.1: la résistance avent et après chauffes(a)

Pourcentage du mortier	0	10	20	30	40
Résistance à la compression (MPa)	16,91	4,63	45,21	44,87	40,96
Résistance témoigne (MPa)	43,69	89,51	74,89	63,56	67,51

Tableau III.2: la résistance avent et après chauffes(b)

Pourcentage du mortier	0	200	400	800	900
Résistance a la compression (Mpa)	16.91	22.98	22.71	35.14	18.53
Résistance témoigné (Mpa)	43.96	47.71	24.41	48.93	43.03

D âpre les figures III.11, III.12 on remarque que Les résultats obtenus montrent que pour tous les mortiers à base de Bentonite On enregistre l'augmentation. De la résistance à la compression au début de l'essai le rapport de la résistance à chaud est diminué jusqu'à Une Faible résistance obtenus à 600°C, et cela est due à l'augmentation considérable de la porosité pour tous Les mortiers Chauffés.

III.2.6Absorption d'eau par capillarite

Les résultats de l'essai d'absorption d'eau par capillarité des différents mortiers réalisés sont résumés dans La figure III.13 :

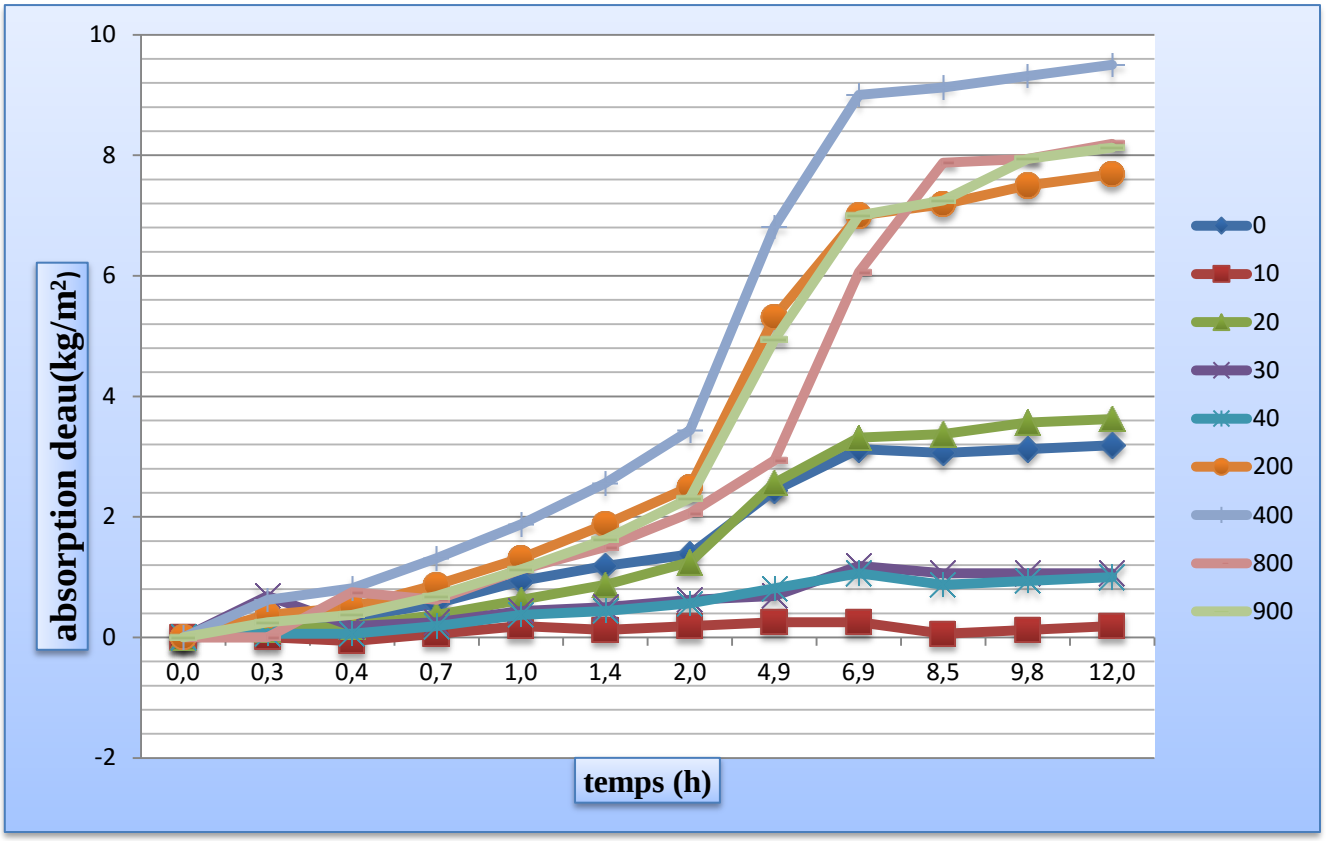


Figure III.13 : Absorption d'eau par capillarite

III.2.7 La résistance aux milieux acide

- **Perte de masse**

  Les résultats de la perte de masse de la période d'immersion dans la solution basique HCL de masse des éprouvettes de mortier avec les périodes.

Tableau III.3: Les résultats de la perte de masse avant et après immersion dans la HCL(a).

Pourcentage du types du mortier (%)	La masse d'éprouvette Avant immersion dans HCL (g)	La masse après 2semaine (g)	La masse après 4semaine (g)
0	535,1	420	403
10	567,2	427,2	409,2
20	556,3	364,2	355
30	555,7	399	386
40	534,3	351,6	345,5

Tableau III.4: Les résultats de la perte de masse avant et après immersion dans la HCL(b).

Pourcentage du type du mortier	La masse d'éprouvette avant immersion dans HCL (g)	La masse après de semaine (g)	La masse après 4semaine
0	535.1	420	403
200	283.4	180.5	172.8
400	214.6	125.4	120.5
800	258.4	147.4	137.3
900	290.5	172.3	165.1









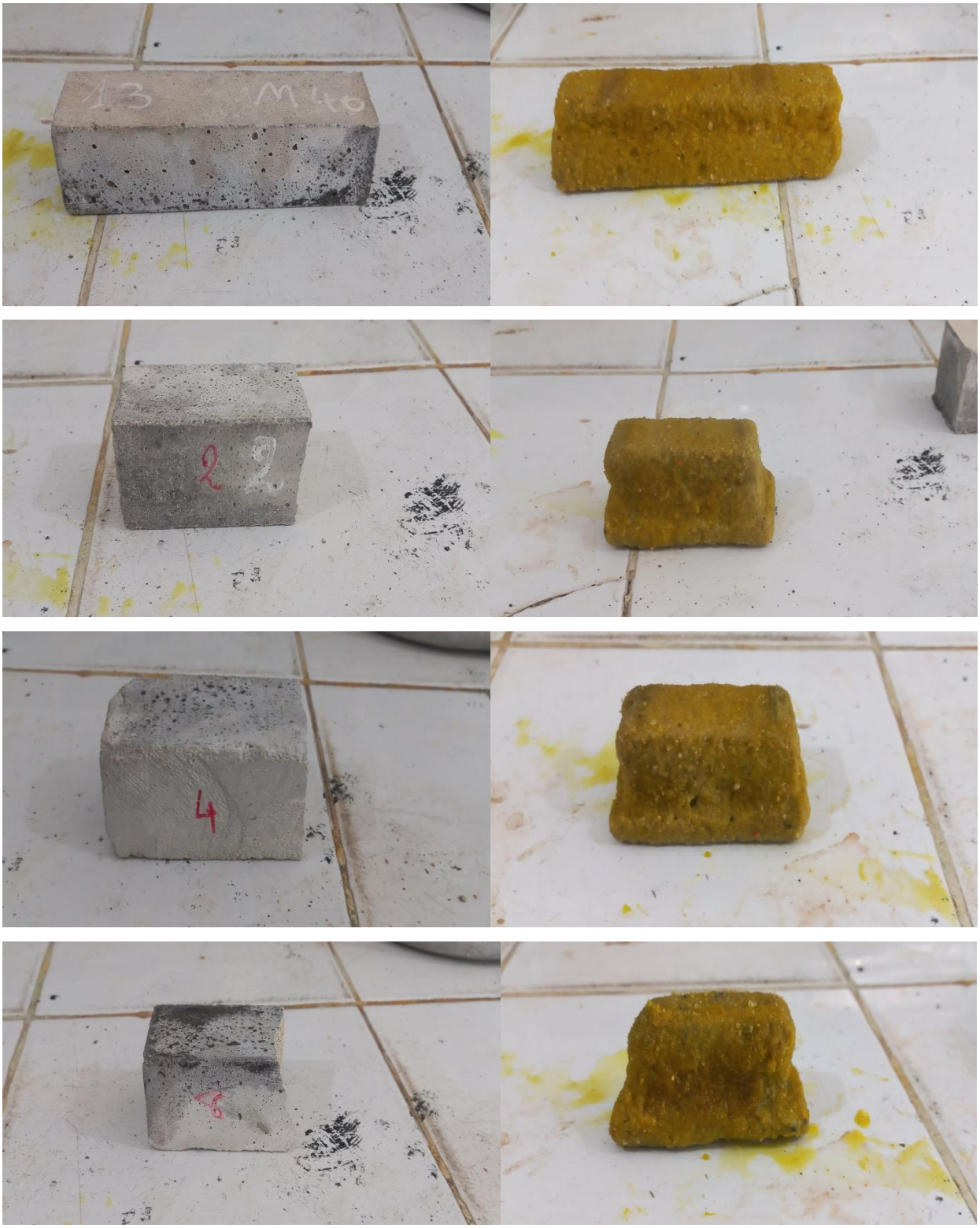


13
M40
2
4



Figure III.14 : Les éprouvettes avant et après immersion dans HCL

Conclusions générales

Conclusion générale

Le travail expérimental s'est porté sur l'étude de l'effet de la bentonite sur les propriétés des mortiers à l'état frais et durci Les conclusions suivantes autant peuvent être tirées :

- La résistance à la compression de mortier augmente : lorsqu'on remplace le ciment par 10 à 40% de Bentonite par rapport au mortier témoin à 28 jours.
- La densité de mortier est diminuée avec l'augmentation de la quantité de B utilisé.
- Augmentions du dosage en bentonite augment le besoin en eau

D'après les résultats on peut conclure que l'utilisation de la bentonite calcique calcinée donne des Performances meilleures.

Recommandations

Nous recommandons ce qui suit :

- Étude de la durabilité du mortier à base de bentonite.

-Valorisation de la bentonite comme un liant dans le mortier.

- Étude des effets de la bentonite de différent pourcentage dans le mortier.

-Influence de haute température sur les propriétés du mortier à base de la bentonite.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

[1] http://hdl.handle.net/2429/68681

[2] https://c8.alamy.com/compfr/gejw2p/sacs-de-25-kg-de-ciment-portland-gejw2p.jpg

[3] https://decorexpro.com/images/article/orig/2018/02/portlandcement-tehnicheskie-harakteristiki-i-primenenie-4.jpg

[4] https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Ffaisons-le-mur.com%2Fdanger-ciment%2F&psig=AOvVaw0UOZSXzxgykmPaToeGjM_L&ust=1685694426517000&source=images&cd=vfe&ved=0CBEQjRxqFwoTCODIhp7Tof8CFQAAAAAdAAAAABBy

[5] https://docplayer.fr/docs-images/64/50608761/images/10-3.jpg

[6] https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.berthold.com%2Ffr-fr%2Fprocess-control%2Findustries%2Fsolutions-mesure-materiaux-de-construction%2Frefroidisseurs-clinker-de-ciment%2F&psig=AOvVaw1mxlAs4d2yEUVWTSzieS93&ust=1685696504198000&source=images&cd=vfe&ved=0CBEQjRxqFwoTCMDGwf3aof8CFQAAAAAdAAAAABAE

[7] https://media.ooreka.fr/public/image/roche-volcanique-pouzzolane-main-13488275.jpg

[8] https://www.medisel.fr/wp-content/uploads/2021/12/GRANUL.gif

[9] https://www.mgs.co.uk/wp-content/uploads/2018/12/Bentonite-Powder-500x500-500x500.jpg

[10] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/44/Flaminggorge.jpeg

[11]https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.researchgate.net%2Ffigure%2FChemical-Composition-of-Bentonite_tbl1_233898015&psig=AOvVaw2UPly8kJJY2WRDeTGD4xt-&ust=1682936998474000&source=images&cd=vfe&ved=0CBEQjRxqFwoTCPDT6YGz0f4CFQAAAAAdAAAAABA

[12]https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.paramvisions.com%2F2021%2F10%2Fwhy-bentonite-powder-is-used-in

[13]http://193.194.93.154:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/2194/Influence%20de%20la%20bentonite%20calcin%C3%A9e%20sur%20%20les%20propri%C3%A9t%C3%A9s%20des%20mortiers%20cimentaire.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[14]https://www.google.com/maps/place/Imerys+Bentonite+Italy/@44.371116,8.253652,15z/data=!3m1!4b1!4m10!1m2!2m1!1sbentonite!3m6!1s0x12d2e851a32dbd47:0xb23ef9648244a560!8m2!3d44.3711021!4d8.272106!15sCgliZW50b25pdGWSARBjb3Jwb3JhdGVfb2ZmaWNl4AEA!16s%2Fg%2F11f542nwy8?hl=fr

[15] https://www.google.com/maps/search/bentonite/@46.0523265,-112.8369708,12z?hl=fr

Annexes

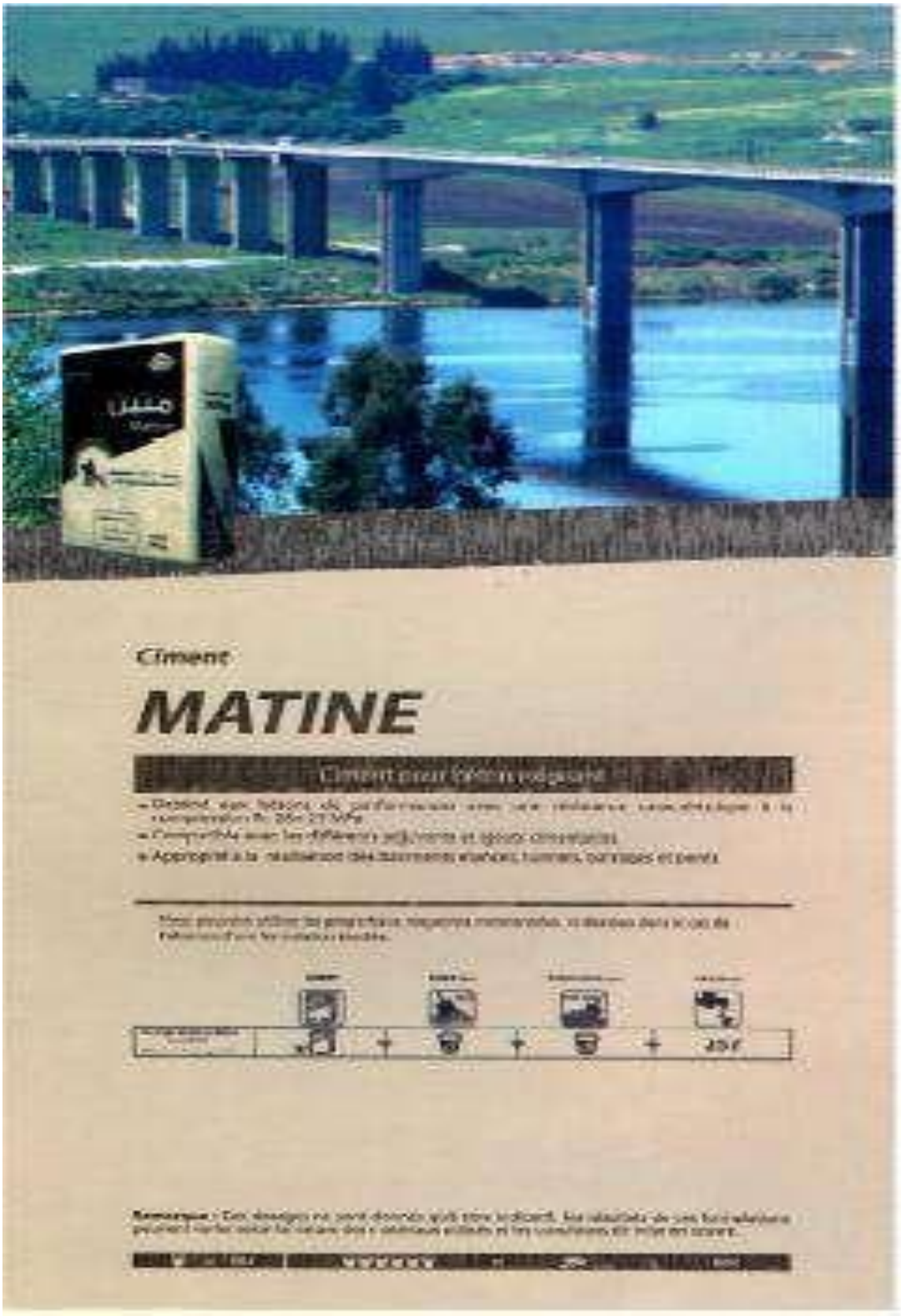


Figure 1 : Fiche technique de cimente utilise

LAFARGE
لافارج

MATINE

Ciment pour béton exigeant

CEM II/A 42,5 R NA 442

FICHE TECHNIQUE

MATINE est un ciment gris de hautes résistances initiales et finales, résultat de la mouture du clinker obtenu par cuisson jusqu'à la fusion partielle (clinkérisation) d'un mélange convenablement dosé et homogénéisé de calcaire et d'argile.

Ce ciment est constitué d'oxydes minéraux dont les principaux sont la chaux (CaO) à fonction basique et la silice (SiO_2) à caractère acide. On trouve également l'alumine (Al_2O_3) et le fer (Fe_2O_3). ils sont rendus aptes à réagir entre eux et avec l'eau par traitement thermique à des températures comprises entre 1300 et 1500°c. En présence d'eau a lieu la réaction d'hydratation consistant en la formation d'un réseau résistant (propriété hydraulique) constitué principalement de microcristaux de silicates de calcium hydratés.

MATINE présente des performances mécaniques et des caractéristiques physico-chimiques conforment à la norme NA 442, EN 197-1 et à la norme NF P 15-301/94 .

Domaine d'utilisation :

MATINE est utilisé pour tous les projets courants qui nécessitent des hautes résistances mécaniques mais ne présentent pas un besoin spécifique dans les ouvrages en béton qui ne sont pas exposés à des conditions sévères comme l'attaque des sulfates du sol ou de l'eau, ainsi que dans les ouvrages dans lesquels le béton n'est pas affecté par le taux de chaleur d'hydratation du ciment.

Les principales applications de ce ciment sont :

- Secteur habitat (logements et d'autres constructions civiles) :
- Secteur travaux publics (tunnels, ponts, port, aéroport .ect) :
- Secteur hydraulique (barrages, châteaux d'eau, stations d'épuration, stations de désallement,..ect) ;
- Secteur industriel.

Algerian Cement Company (SPA)
33, Rue des Pins. Hydra. Alger, Algérie
Tél.: +213 (0) 21 48 16 65
Fax : +213 (0) 21 48 16 71

Figure 2 : Fiche technique de cimente utilise



NOTICE PRODUIT

Sika® ViscoCrete® TEMPO-10

Superplastifiant/Haut réducteur d'eau de nouvelle génération polyvalent

INFORMATIONS SUR LE PRODUIT

Sika® ViscoCrete® TEMPO-10 est un superplastifiant/haut réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération non chloré, à base de copolymère acrylique.

DOMAINES D'APPLICATION

Sika® ViscoCrete® TEMPO-10 convient pour la confection de béton en préfabrication, béton sur chantier et béton prêt à l'emploi. Sika® ViscoCrete® TEMPO-10 est utilisé pour béton en cas de temps de transport ou délai de mise en oeuvre prolongés.
Sika® ViscoCrete® TEMPO-10 permet la fabrication des:

- Bétons plastiques à très fluides
- Bétons à faibles rapports E/C avec ou sans fumée de silice
- Bétons avec réduction d'eau maximale (jusqu'à 30 %)
- Bétons avec air entraîné

CARACTÉRISTIQUES / AVANTAGES

Sika® ViscoCrete® TEMPO-10 combine plusieurs mécanismes d'action. Par adsorption à la surface et le clivonnement des fines pendant le processus d'hydratation les propriétés suivantes sont atteintes:

- Réduction d'eau extrêmement importante (donc étanchéité et résistances élevées)
- Fluidité élevée (donc moins de travail pour la mise en oeuvre et le compactage)
- Evolution plus rapide des résistances à court terme
- Etanchéité fortement améliorée
- Meilleures caractéristiques de fluage et de retrait
- Carbonatation du béton ralentie

Sika® ViscoCrete® TEMPO-10 ne contient ni chlorures ni autres substances susceptibles de provoquer ou de favoriser la corrosion de l'acier, et peut donc être utilisé sans restrictions pour la construction d'ouvrages en béton armé et précontraint.

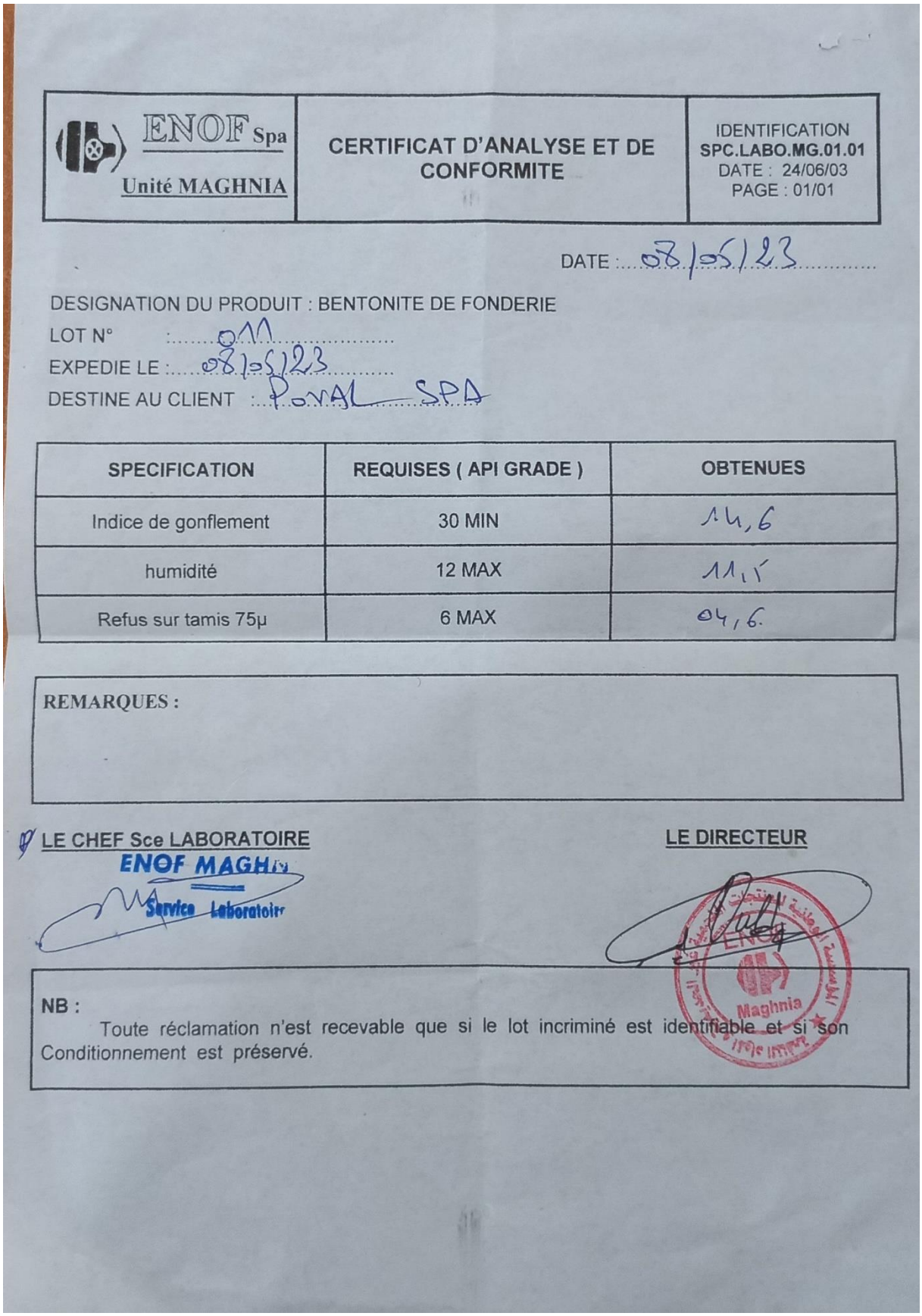
AGRÉMENTS / NORMES

Sika® ViscoCrete® TEMPO-10 répond aux exigences de la norme NF EN 934-2 tableaux 1, 3.1 & 3.2.
PV CNERIB: DTEM 251/2016.

DESCRIPTION DU PRODUIT

Conditionnement	• Fût de 200 kg • Cubi de 1100 kg
Aspect / Couleur	Liquide brun clair.
Durée de Conservation	12 mois de la date de production si le produit est stocké correctement en emballage intact.
Conditions de Stockage	Dans un local fermé, à l'abri de l'ensoleillement direct et du gel, entre 5 et 30 °C. Sika® ViscoCrete® TEMPO 10 peut geler, mais une fois dégelé lentement et réhomogénéisé, il retrouve ses qualités d'origine. En cas de gel prolongé et intense, vérifier qu'il n'a pas été déstabilisé.
Densité	1.060 ± 0.010

Figure 3 : Fiche technique d'adjuvant Tempo -10



ENOF Spa
Unité MAGHNIA

CERTIFICAT D'ANALYSE ET DE CONFORMITE

IDENTIFICATION
SPC.LABO.MG.01.01
DATE : 24/06/03
PAGE : 01/01

DATE : 08/05/23

DESIGNATION DU PRODUIT : BENTONITE DE FONDERIE
LOT N° : 011
EXPEDIE LE : 08/05/23
DESTINE AU CLIENT : POVAL SPA

SPECIFICATION	REQUISES (API GRADE)	OBTENUES
Indice de gonflement	30 MIN	14,6
humidité	12 MAX	11,1
Refus sur tamis 75µ	6 MAX	04,6

REMARQUES :

LE CHEF Sce LABORATOIRE
ENOF MAGHNIA
Service Laboratoire

LE DIRECTEUR
ENOF Maghnia

NB :
Toute réclamation n'est recevable que si le lot incriminé est identifiable et si son Conditionnement est préservé.

Figure 4 : Fiche technique de bentonite