



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب

Université d'Ain-Temouchent- Belhadj Bouchaib

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Civil & Travaux Publics

Mémoire pour l'Obtention du diplôme de Master

Filière : GENIE CIVIL

Spécialité : STRUCTURE

Thème :

FABRICATION D'UN MORTIER A BASE DU CIMENT ROMAIN

PRESENTE PAR :

- ✓ CHOUIREF FATIMA ZOHRA
- ✓ MEKKAOUI DOUNIA OUAFA

SOUTENU LE : 22 JUIN 2023

DEVANT LE JURY COMPOSE DE :

PRESIDENTE MME. MAROUF. H

EXAMINATRICE MME. ABDESSELEM. R

ENCADRANTE MME. DERBAL. A

ANNEE UNIVERSITAIRE 2022/2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciement

*Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et
miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce
Modeste travail*

*Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et nos sincères
remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à
la réalisation de ce mémoire*

*Tout d'abord, nous tenons à exprimer notre reconnaissance à notre
encadrante, Mme DERBAL Ahlem, pour son soutien inestimable tout au
long de ce processus de recherche. Sa guidance, son expertise et sa
disponibilité ont été essentielles pour l'élaboration de ce mémoire. Ses
conseils éclairés nous ont permis d'approfondir nos connaissances, de
développer notre réflexion de et qui a suivi fidèlement notre travail, pour
son énergie, pour sa patience et son encouragement.*

*A toute l'équipe de laboratoire de génie civil : KEDDOU Adél, Kawther et
Najet. Je vous remercie de tout cœur, de ces merveilleux moments passés
avec vous tous. Ces derniers resteront gravés dans nos cœurs, dans nos
âmes, dans nos esprits, par leurs sincérités et leurs simplicités Vous avez
rayonné merveilleusement dans ma vie. Merci pour m'avoir apporté l'aide
dont j'avais besoin Avec toute mon affectation et estime je vous souhaite
beaucoup de réussite et de bonheur*

*nous souhaiterions remercier les membres de jury pour leur l'intérêt que
vous avez bien voulu porter à nos travaux en acceptant de faire partie de*

ce jury. Ce n'est un honneur pour nous que d'avoir l'occasion de discuter des résultats de nos recherches avec plusieurs profs qui les ont inspirées.

Enfin, nous exprimons notre gratitude envers toutes les personnes qui ont participé à notre TRAVAIL recherche, en partageant leur expertise, en répondant à nos questions ou en nous offrant leur temps précieux. Leurs contributions ont été essentielles pour obtenir des informations pertinentes et enrichir notre travail.

Nos remerciements s'adressent également à tous les enseignant(e)s du département de Génie civil

Merci du fond du cœur

Dédicace

En ce moment important de ma vie, alors que je termine mes études, je voulais prendre un moment pour vous exprimer ma gratitude et vous dédier cette réussite.

Cher papa

Tu es bien plus qu'un père pour moi, tu es mon roc, mon guide et mon modèle,

Je me souviens de tous ces moments partagés, des instants où tu m'as encouragé lorsque je doutais de moi-même, des heures passées à m'apprendre les leçons de vie qui ne se trouvent pas dans les manuels scolaires Tu as été présent dans mes réussites et mes échecs, toujours là pour me soutenir et me guider .Papa, je t'aime du plus profond de mon cœur. Ta présence est un cadeau précieux dans ma vie, et je serai toujours reconnaissante de t'avoir comme père. Je suis fière d'être ton enfant, et je ferai de mon mieux pour te rendre fier chaque jour.

Chère mama

Ma première enseignante, Maman, tu es une femme exceptionnelle avec une force intérieure qui m'inspire chaque jour. Tu es une source infinie d'amour, de sagesse et de gentillesse. Ta générosité déborde et tu donnes sans compter à ceux qui t'entourent. Ta présence aimante a toujours été un refuge pour moi. Dans les moments de tristesse, tu as séché mes larmes et m'as réconfortée avec tes mots doux. Dans les moments de joie, tu as célébré mes réussites et partagé ma fierté. Tu as toujours été là pour m'écouter, me comprendre et m'encourager, peu importe les circonstances. Grâce à toi, j'ai appris à être forte face aux difficultés, à croire en moi-même et à poursuivre mes rêves sans jamais abandonner. Ce message est bien plus qu'une simple dédicace pour la fin de mes études, c'est une déclaration d'amour et de gratitude. Je veux que tu saches combien tu es précieuse pour moi, et que je serai toujours là pour toi, comme tu l'as été pour moi.

Vous avez été mes premiers mentors, C'est grâce à vous que je peux aujourd'hui regarder vers l'avenir avec confiance et détermination. Votre rôle dans ma vie est irremplaçable, et je suis honorée d'être votre fille.

Je dédie ce travail à mes sœurs adorées Aliaa et Nerdjes, à ma copine Dounia, Kenza et Abelhadi , Je ne peux pas ignorer le soutien et l'encouragement de mes amis qui ont été une source de force et d'inspiration pour mener à bien ce travail , Merci d'être les personnes merveilleuses que vous êtes.

Fatima Zohra

Dédicace

Ce mémoire n'aurait jamais été réalisé sans l'aide d'ALLAH qui nous a donné la force, la volonté et le courage d'accomplir cet humble travail malgré les différentes circonstances survenues durant l'année.

Je dédie cet événement marquant de ma vie et ma remise de diplôme :

*A mon très cher père **MEKKAOUI Hanin Jamel***

Tu es parti si tôt et tu n'as pas pu voir ma soutenance. Tu as toujours été pour moi un exemple du père respectueux, honnête, de la personne méticuleuse, je tiens à honorer l'homme que tu es.

Grâce à toi papa j'ai appris le sens du travail et de la responsabilité. Je voudrais te remercier pour ton amour, ta générosité, ta compréhension... Ton soutien fut une lumière dans tout mon parcours. Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour l'estime et le respect que j'ai toujours eu pour toi. Ce modeste travail est le fruit de tous les sacrifices que tu as déployés pour mon éducation et ma formation. Je t'aime papa et j'espère que vous serez toujours fier de moi. Dors en paix, que Dieu t'accueille dans son paradis

*A ma très chère maman **CHALLEL Nadia***

*A une personne qui m'a tout donné sans compter. Tu représentes pour moi le symbole de la source de tendresse, de patience et de générosité et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi. Un grand merci ne suffira pas pour tous les sacrifices que tu n'as cessé de me donner depuis ma naissance Le bonheur, c'est avoir une mère qui nous aime
Que dieu te prête encore plus de vie*

*A mes chère sœur **Loubna** et **Feriel Rihab** qui n'ont pas cessée de m'encourager et soutenir tout au long de mes études. Que Dieu les protège et leurs offre la chance et le bonheur*

*Un grand merci à ma chère amie, mon binôme dans ce mémoire, **Fatima** et je souhaite que l'amitié que nous a réuni persiste pour toujours et que nous arrivons à réaliser nos rêves...*

A mes chers ami(e)s sans exception, merci pour votre amour et vos encouragements.

A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin dans l'élaboration de ce travail. A tous ceux qui, par un mot, m'ont donné la force de continuer.

Dounia ouafa

Résumé

Ce travail consiste à formuler un béton ancien appelé le béton romain à base de la chaux et de la pouzzolane naturelle. Basé sur plusieurs recherches il a été constaté que ce type de béton acquis des performances au cours du temps, même en présence de l'eau de mer.

Sur cette base une étude expérimentale est menée en fabricant un béton romain à base de la chaux et de la pouzzolane naturelle. Comme la formulation de ce béton reste un mystère non résolu jusqu'à aujourd'hui, on a essayé de varier plusieurs pourcentage entre la chaux et la pouzzolane, et on variant aussi le milieu de conservation entre l'eau potable et l'eau de mer.

Des essais de résistance à la flexion et à la compression ainsi que les essais de conductivité thermique et des essais ultrason ont été mené.

Mots clés : béton romain, pouzzolane, chaux, résistances mécaniques, conductivité thermique, ultrason.

Abstract

This work involves the use of an ancient concrete mixture known as Roman concrete, which is based on lime and natural pozzolan. Based on several studies, it has been discovered that this type of concrete improves over time, even when exposed to seawater.

Based on this, an experimental study was conducted in the laboratory to manufacture Roman concrete using lime and natural pozzolan. Since the formulation of this concrete remains an unsolved mystery to this day, we attempted to vary the percentage ratios between lime and pozzolan, and we also diversified the preservation medium between drinking water and seawater.

Tests were conducted for flexural and compressive strength, as well as tests for thermal conductivity and ultrasonic waves.

Key words: roman concrete, pozzolan, lime, mortar, mechanical resistance, thermal conductivity, ultrasound.

ملخص

يتألف هذا العمل من استخدام خليط خرساني قديم يُعرف باسم الخرسانة الرومانية، والذي يستند إلى مكونات الجير والبوزولان الطبيعي. استنادًا إلى العديد من الدراسات، تم اكتشاف أن هذا النوع من الخرسانة يتحسن مع مرور الوقت، حتى عند تعرضه للمياه البحرية.

بناءً على ذلك، تم إجراء دراسة تجريبية في المخبر لتصنيع الخرسانة الرومانية باستعمال الجير والبوزولان الطبيعي. نظرًا لأن تركيبة هذه الخرسانة لا تزال لغزًا غير محلول حتى الآن، حاولنا تغيير النسب المئوية بين الجير والبوزولان، وقمنا أيضًا بتنويع الوسط الحافظ بين مياه الشرب ومياه البحر.

تم إجراء اختبارات لقوة الانحناء والضغط، بالإضافة إلى اختبارات التوصيل الحراري والموجات فوق الصوتية.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة الرومانية، البوزولان، الجير، المقاومة الميكانيكية، توصيل حراري، الموجات فوق الصوتية.

Sommaire

Remerciement	i
Dédicace	iii
Résumé	vi
Liste des figures	ix
Liste des tableaux	xiii
Liste des abréviations	xv
Introduction générale	1
Chapitre I : Etat de l'art sur le béton romain	
1.1. Introduction	2
1.2. L'historique	2
1.3. Les avantages et les inconvénients de béton romain	5
1.3.1. Les avantages	5
1.3.2. Les inconvénients	6
1.4. Fabrication de béton romain	6
1.5. L'influence de pouzzolane sur la qualité des bétons	7
1.5.1. A l'état frais	7
1.5.2. A l'état durci	7
1.6. Comparaison entre le béton romain et le ciment portland	7
1.7. Comment l'eau de mer peut-elle renforcer le béton ?(le renforcement de béton avec l'eau de mer)	8
1.8. Diminution de l'utilisation de béton romain	8
1.9. Le secret de béton romain	9
1.10. Travaux des chercheurs sur le béton romain	9
1.11. L'auto-guérison au cœur du processus	13
1.12. Béton romain : une recette à réinventer	14
1.13. Les propriétés de béton romain antique	15
1.14. Béton romain moderne	15
1.15. Conclusion	17
Chapitre II: Caractéristiques mécaniques des matériaux utilisés	
2.1. Introduction	18
2.2. Caractéristiques des matériaux	18

2.2.1. La masse volumique (NF P94-061-2)	18
2.2.1.1. La masse volumique apparente	18
2.2.1.2. La masse volumique absolue	19
2.2.2. Surface spécifique Blaine (NF EN 196-6)	20
2.2.3. Porosité (NF 1097-4)	22
2.2.4. L'absorption (P18-554)	23
2.2.5. Le ciment	25
2.2.6. Le sable	29
2.2.6.1. Analyse granulométrique (EN933-2)	31
2.2.6.2. Module de finesse	33
2.2.6.3. Essai d'équivalent de sable (P18-598)	34
2.2.7. La pouzzolane	36
2.2.7.1. L'analyse chimique de pouzzolane naturelle	37
2.2.7.2. Séchage de pouzzolane	37
2.2.7.3. Broyage de la pouzzolane	38
2.2.7.4. Tamisage de la pouzzolane	38
2.2.7.5. Les caractérisations techniques de pouzzolane	40
2.2.8. Gypse	41
2.2.9. La chaux	44
2.2.9.1. L'analyse chimique de chaux	44
2.2.10. L'eau de gâchage	47
2.2.10.1. L'analyse chimique de l'eau potable	47
2.2.11. L'eau de mer	47
2.2.11.1. L'analyse chimique de l'eau de mer	47
2.2.12. L'adjuvant	47
2.2.12.1. Plastifiant	47
2.2.13. Les fibres	48
2.2.13.1. Les fibres polypropylène	48
2.3. Conclusion	49
Chapitre III: Confection des mortiers et essais mécaniques	
3.1. Introduction	50
3.2. Formulation des mortiers	50

3.2.1. Mortier ordinaire (témoin)	50
3.2.2. Mortier à base de pouzzolane	51
3.3. Mortier à base de pouzzolane et des fibres	53
3.4. Préparation des mortiers	53
3.5. Préparation des éprouvettes	54
3.6. Conservation des éprouvettes	55
3.7. Les essais sur mortier à l'état durci	56
3.7.1. Ultra son	56
3.7.2. Essai d'absorption d'eau	58
3.7.3. Essai de conductivité thermique	59
3.8. Caractéristiques mécaniques des éprouvettes	61
3.9. Les essais mécaniques sur les éprouvettes	61
3.9.1. Résistance à la traction par flexion (NFP18-407)	61
3.9.2. Résistance à la compression	63
3.10. Conclusion	64
Chapitre IV: Résultats et discussion	
4.1. Introduction	65
4.2. Résultats	65
4.2.1. Essai ultrason	65
4.2.2. Essai d'absorption	68
4.2.3. Essai conductivité thermique	71
4.2.4. Résistance à la flexion et compression	75
4.2.4.1. Mortier ordinaire (témoin)	75
4.2.4.2. Mortier à base de pouzzolane	78
4.2.5. Discussion	86
4.2.5.1. L'influence des différents pourcentages de pouzzolane	87
4.3. Conclusion	87
Conclusion générale	89
Références bibliographiques	91

Liste des figures

Chapitre I : Etat de l'art sur le béton romain		
Figure 1.1	Le Colisée de Rome	4
Figure 1.2	Le panthéon de Rome	4
Figure 1.3	Forum romain	5
Figure 1.4	L'arc de Trajan Timgad Algérie	5
Figure 1.5	La canalisation pour l'alimentation de La fontaine de Trevi	10
Figure 1.6	La fontaine de Trevi	10
Figure 1.7	Les aqueducs Romain	11
Figure 1.8	Le système de fonctionnement des aqueducs Romain	11
Figure 1.9	Forage sur une structure marine à Portus Cosanus, Toscane, 2003. Photo prise par J. P Oleson	14
Chapitre II: Caractéristiques mécaniques des matériaux utilisés		
Figure 2.1	Produit Toluène	20
Figure 2.2	L'appareil de Surface Spécifique Blaine	22
Figure 2.3	Essai de Porosité	23
Figure 2.4	L'essai d'absorption	25
Figure 2.5	Sac de ciment	26
Figure 2.6	La masse volumique apparente de ciment	28
Figure 2.7	La masse volumique absolue de ciment	28
Figure 2.8	La masse volumique Apparente de sable	29
Figure 2.9	La masse Absolue de sable	30
Figure 2.10	Essai d'Analyse granulométrique	32
Figure 2.11	Courbe granulométrique de sable	34
Figure 2.12	Schéma de détermination l'équivalent de sable	35
Figure 2.13	Essai Equivalent de Sable	35
Figure 2.14	Pouzzolane naturelle	36
Figure 2.15	Caractéristiques de pouzzolane	38

Figure 2.16	Etuve	38
Figure 2.17	Broyage et préparation de pouzzolane	39
Figure 2.18	Appareil de MICRO DEVAL et Tamiseuse	40
Figure 2.19	La masse volumique apparente de Pouzzolane	40
Figure 2.20	La masse volumique absolue de pouzzolane	40
Figure 2.21	Le Gypse	41
Figure 2.22	La masse volumique absolue de gypse	43
Figure 2.23	La masse volumique apparente de gypse	43
Figure 2.24	La masse volumique apparente de chaux	46
Figure 2.25	Caractéristiques chimiques de chaux	46
Figure 2.26	Plastifiant	48
Figure 2.27	Les fibres polypropylène	48
Chapitre III: Confection des mortiers et essais mécaniques		
Figure 3.1	Fabrication des mortiers	50
Figure 3.2	Mortier ordinaire témoin	51
Figure 3.3	Mortier à base de pouzzolane et chaux	52
Figure 3.4	Malaxeur	54
Figure 3.5	Les éprouvettes de mortier à l'état frais	55
Figure 3.6	Les éprouvettes dans un bain-marie	55
Figure 3.7	Marquage des éprouvettes	56
Figure 3.8	Conservation des éprouvettes	56
Figure 3.9	Appareil de l'ULTRASON	57
Figure 3.10	Essai d'absorption par capillarité	59
Figure 3.11	Appareil de conductivité thermique	61
Figure 3.12	Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion	62
Figure 3.13	Appareil de flexion	62
Figure 3.14	Schéma de l'essai de compression de l'éprouvette 4x4x16	63
Figure 3.15	Appareil de compression	64

Chapitre IV: Résultats et discussion

Figure 4.1	Vitesse de propagation en fonction de conductivité thermique (témoin)	66
Figure 4.2	Vitesse de propagation des mortiers a T=24°C	68
Figure 4.3	Coefficient d'absorption des mortiers en fonction de temps.	70
Figure 4.4	Coefficient d'absorption des mortiers en fonction de Type de mortier	71
Figure 4.5	Coefficient d'absorption d'eau en fonction de conductivité thermique(témoin)	72
Figure 4.6	Vitesse de propagation d'onde en fonction de conductivité thermique (pouzzolane).	72
Figure 4.7	Résistance à la flexion de témoin en fonction de conductivité thermique.	73
Figure 4.8	Résistance à la compression de témoin en fonction de conductivité thermique.	73
Figure 4.9	Résistance à la flexion de pouzzolane et des ajouts en fonction de conductivité thermique.	74
Figure 4.10	Résistance à la compression de pouzzolane et des ajouts en fonction de conductivité thermique.	74
Figure 4.11	Résistance à la flexion de témoin.	75
Figure 4.12	Résistance à la compression de témoin.	76
Figure 4.13	Courbe de résistance à la compression de témoin en fonction de temps.	77
Figure 4.14	Résistance à la compression de témoin en fonction de temps.	77
Figure 4.15	Résistance à la flexion en fonction de pouzzolane.	79
Figure 4.16	Résistance à la compression en fonction de pouzzolane.	79
Figure 4.17	Courbe de résistance à la compression de pouzzolane en fonction de jours.	80
Figure 4.18	Résistance à la compression de pouzzolane en fonction de jours.	81
Figure 4.19	Résistance à la flexion en fonction de pouzzolane.	82
Figure 4.20	Résistance à la compression en fonction de pouzzolane.	82
Figure 4.21	Courbe de résistance à la compression de pouzzolane en fonction de jours.	83
Figure 4.22	Résistance à la compression de pouzzolane en fonction de jours.	83
Figure 4.23	Résistance à la flexion en fonction de pouzzolane et des ajouts.	84
Figure 4.24	Résistance à la compression en fonction de pouzzolane et des ajouts.	85
Figure 4.25	Courbe de résistance à la compression de pouzzolane et des ajouts en fonction de jours.	85

Figure 4.26	Résistance à la compression de pouzzolane et des ajouts en fonction de jours.	86
--------------------	---	-----------

Liste des tableaux

Chapitre II : Caractéristiques mécaniques des matériaux utilisés		
Tableau 1	Les constituants de ciment CEMIIN-L 42,5	25
Tableau 2	L'analyse chimique de ciment	26
Tableau 3	La masse volumique de ciment	27
Tableau 4	Les caractéristiques physiques de ciment	29
Tableau 5	La Masse Volumique de Sable.	30
Tableau 6	Résultats d'Analyse granulométrique de sable des mouches	32
Tableau 7	Résultats d'analyse granulométrique de sable de correction	33
Tableau 8	Résultat d'équivalent de sable	36
Tableau 9	Les caractéristiques physiques de sable des mouches	36
Tableau 10	Caractéristiques chimique de pouzzolane	37
Tableau 11	La Masse volumique de Pouzzolane	39
Tableau 12	Les caractéristiques physiques de pouzzolane	41
Tableau 13	La masse volumique de Gypse	42
Tableau 14	Les caractéristiques physiques de gypse	43
Tableau 15	Caractéristiques chimique de chaux	44
Tableau 16	La masse volumique de Chaux	45
Tableau 17	Les caractéristiques physiques de chaux	46
Tableau 18	Caractéristiques chimique de l'eau potable	47
Tableau 19	Caractéristiques chimiques de l'eau de mer	47
Chapitre III: Confection des mortiers et essais mécanique		
Tableau 20	Compositions massiques des mortiers témoins	51
Tableau 21	Compositions des mortiers à divers pourcentages de pouzzolane	52
Tableau 22	Compositions des mortiers à base de pouzzolane et des fibres	53
Chapitre IV: Résultat et discussion		
Tableau 23	La vitesse de propagation des éprouvettes témoins	65

Tableau 24	La vitesse de propagation des différents pourcentages de pouzzolane	66
Tableau 25	Essai d'absorption d'eau	69
Tableau 26	Coefficient d'absorption d'eau dans un temps différent	69
Tableau 27	Les résultats de conductivité thermique	71
Tableau 28	Résultats des mortiers ordinaires après 28 jours	75
Tableau 29	Résultats des mortiers conservés dans l'eau de mer après 28 jours	78
Tableau 30	Résultats des mortiers conservés dans l'eau saturée en chaux	81
Tableau 31	Résultats des mortiers avec des ajouts conservés dans l'eau de mer	84

Liste des abréviations

Chapitre II : caractéristiques des matériaux utilisés

CEM III : ciment de haut fourneau.

ENG : Entreprise nationale des granulats.

ρ : Masse volumique apparente.

M : Masse de l'échantillon.

V : Le volume total.

S: Surface spécifique Blaine.

K: Constante de l'appareil.

Mv abs: La masse volumique absolue de liant

n: Porosité en général 0,5.

t: Le temps.

η : Viscosité dynamique de l'air, à la température de l'essai.

M0 : La masse de l'échantillon après séchage.

M1 : La masse de l'échantillon imbibé.

SiO₂: Dioxyde de silicium.

AL₂O₃: L'alumine ou oxyde d'aluminium.

Fe₂O₃: L'oxyde de fer.

CaO: L'oxyde de calcium.

MgO: Méthylglyoxal.

K₂O: L'oxyde de potassium.

Na₂O: L'oxyde de sodium.

SO₃: Trioxyde de soufre.

PF: Pentafluorure de phosphore.

Mr par : Masse des refus partielle.

Mr cum : Masse des refus cumulés.

%R cumu : Pourcentage refus cumulé.

P₂O₅ : L'hémipentoxyde de phosphore.

TiO₂ : Dioxyde de titane.

CaCO₃ : Carbonate de calcium.

Si : Silicium.

Cu₅FeS₄ : **Sulfure** naturel de fer et de cuivre.

CaF₂ : Fluorure de calcium.

NaErF₄: Sodium erbium fluorium.

Cr: Le chrome.

UO₂: Dioxygène.

PrO_{1.83} : Paraseodium oxyde.

HCO₃: Bicarbonate.

CO₃: Trioxyde de carbone.

SO₄: Sulfate.

Mg: Magnésium.

Cl: Chlore.

Chapitre III : confection des mortiers et essais mécaniques

MTEP: Mortier témoin préparé par l'eau potable.

MTEM: Mortier témoin préparé par l'eau de mer.

MPEM (%A) : Mortier pouzzolane préparé par l'eau de mer pourcentage A.

MPEP (%A) : Mortier pouzzolane préparé par l'eau potable pourcentage A.

MPEM (%B) : Mortier pouzzolane préparé par l'eau de mer pourcentage B.

MPEP (%B) : Mortier pouzzolane préparé par l'eau potable pourcentage B.

MPEM (%E) : Mortier pouzzolane préparé par l'eau de mer pourcentage E.

MPEP (%E) : Mortier pouzzolane préparé par l'eau potable pourcentage E.

P : Désigne la pouzzolane.

F : Désigne les fibres.

V : La vitesse de propagation du son en (m/s).

S : Distance entre les têtes en (m).

T : Le temps que met l'impulsion pour parcourir la longueur en (μ s).

Ms : Masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve à 105 °C.

Ma : Masse de l'échantillon imbibé, surface sèche déterminée comme suit.

Rf : La résistance en flexion, en newtons par millimètre carré ou en MPA.

b : Le côté de la section carrée du prisme en (mm).

P : La charge appliquée au milieu du prisme à la rupture en (N).

L : La distance entre les appuis en (mm).

RC : Résistance à la compression en (MPa).

FC : Charge de rupture en (N).

b : Côte de l'éprouvette est égale à 40mm.

Chapitre IV : Résultats et discussion

MTEM: Mortier témoin préparé par l'eau de mer.

MTEP : Mortier témoin préparé par l'eau potable.

PAEM: Pourcentage A préparé par l'eau de mer.

PAEP : Pourcentage A préparé par l'eau potable.

PBEM: Pourcentage B préparé par l'eau de mer.

PBEP : Pourcentage B préparé par l'eau potable.

PEEM: Pourcentage E préparé par l'eau de mer.

PEEP : Pourcentage E préparé par l'eau potable.

K : Conductivité thermique.

C : Chaleur spécifique.

D : Diffusivité.

R : Résistivité.

T : La température.

Introduction générale

Le béton romain est un matériau de construction développé par les romains au 1^{er} siècle avant J.C il se compose de ciment naturel, de sable et de granulats .Il a été utilisé pour la construction de nombreux bâtiment ponts et aqueducs .Le béton romain est connue pour sa résistance et sa capacité maintenir sa forme même dans des conditions extrêmes. Les structures en béton romain sont encore visible aujourd'hui plusieurs siècle après leur construction et témoignent de l'Ingéniosité et de la capacité des Ingénieurs romains à concevoir des structures durables.

L'objectif du notre travail est de « concevoir » pouvoir formuler un mortier romain avec les mêmes caractéristiques que le mortier romain ancien, en particulier sa capacité de conserver ses propriétés dans l'eau de mer et d'avoir des résistances en compression qui se développer en fonction du temps.

Ce travail va nous permettre non seulement de résister le mortier romain, mais aussi valorise un produit naturel qui est la pouzzolane sans oublier notre contribution à la préservation de l'environnement par la réduction de l'utilisation du ciment portland et par la suite réduire l'impact des émissions du CO2 dans l'environnement.

Notre mortier sera un matériau écologique qui n'est pas pour néfaste l'environnement, notre travail sera organisé comme la suite :

On commence par une première partie qui traite l'état de l'art ou une revue bibliographique de notre travail et elle sera divisée en deux chapitres :

- Le premier chapitre est un historique sur le béton romain.
- Le second chapitre présente les travaux des chercheurs sur le béton romain aussi que ses caractéristiques.

-La deuxième partie du travail est l'expérimentale divisée en deux chapitres aussi.

- Le troisième chapitre : Les matériaux utilisés et méthode d'essai où on présente les différents matériaux utilisés pour la fabrication de mortier romain ainsi que leurs caractéristiques.
- Le quatrième chapitre : Les différentes formulations ainsi que les modes de conservation décrites aussi.
- Le cinquième chapitre on donne les résultats obtenus et leurs interprétations
- Enfin on termine par une conclusion générale.

Chapitre I : Etat de l'art sur le béton

1.1 Introduction :

Le béton romain est un très ancien matériau de construction à base de chaux. Bien qu'elle ait plus de 2000 ans, sa solidité et sa durabilité continuent de fasciner les chercheurs[1].

-Les Romains ont fabriqué leur béton en mélangeant des cendres volcaniques avec de la chaux et de l'eau de mer pour former un mortier. Ensuite, ils ont incorporé des morceaux de roches volcaniques dans ce mortier pour former l'agrégat dans le béton. La combinaison de cendres, d'eau et de chaux vive produit ce qu'on appelle une réaction pozzolanique nommée d'après la ville de Pozzuoli dans la baie de Naples. Les Romains ont eu l'idée de ce mélange en s'inspirant des gisements de cendres volcaniques qui se cimentent naturellement et qu'on connaît comme le tuf volcanique. Ce dernier est fréquent dans la région.[2]

-Le béton romain dès le deuxième siècle jusqu'à la fin de l'Empire romain. Il a été utilisé pour la construction de monuments, de grands bâtiments, d'infrastructures telles que des routes et des ponts. La qualité du béton est excellente et les bâtiments et monuments qui existent encore aujourd'hui témoignent de l'authenticité de l'architecture romaine.

1.2L'historique :

-Les anciens Romains étaient des maîtres de l'architecture et de l'ingénierie, peut-être mieux représentés par leurs aqueducs. Le béton pouzzolanique est un béton étonnamment durable qui a donné aux structures romaines une force incroyable.

-En 600 avant JC, les Grecs avaient découvert un matériau naturel de pouzzolane qui développait des propriétés hydrauliques lorsqu'il était mélangé à de la chaux, mais les Grecs étaient loin d'être aussi prolifiques dans la construction en béton que les Romains. En 200 avant JC, les Romains construisaient avec beaucoup de succès en utilisant du béton, mais ce n'était pas comme le béton que nous utilisons aujourd'hui. Ce n'était pas un matériau plastique coulant coulé dans des formes, mais plutôt des gravats cimentés. Les Romains ont construit la plupart de leurs structures en empilant des pierres de différentes tailles et en remplissant à la main les espaces entre les pierres avec du mortier. Au-dessus du sol, les murs étaient revêtus à l'intérieur et à l'extérieur de briques d'argile qui servaient également de coffrage pour le béton. La brique avait peu ou pas de valeur structurelle et leur utilisation était principalement cosmétique. Avant cette époque, et dans la plupart des endroits à cette époque (y compris 95 % de Rome), les mortiers couramment utilisés étaient un simple ciment calcaire qui durcissait

lentement en réagissant avec le dioxyde de carbone en suspension dans l'air. Une véritable hydratation chimique n'a pas eu lieu. Ces mortiers étaient faibles[3].

-Pour les structures plus grandes et plus astucieuses des Romains, ainsi que pour leur infrastructure terrestre nécessitant plus de durabilité, ils fabriquaient du ciment à partir d'un sable volcanique naturellement réactif appelé harena fossicia. Pour les structures marines et celles exposées à l'eau douce, telles que les ponts, les quais, les égouts pluviaux et les aqueducs, ils ont utilisé un sable volcanique appelé pouzzolane. Ces deux matériaux représentent probablement la première utilisation à grande échelle d'un véritable liant cimentaire. Pozzuolana[3] et harena fossicia réagissent chimiquement avec de la chaux et de l'eau pour s'hydrater et se solidifier en une masse rocheuse qui peut être utilisée sous l'eau. Les Romains ont également utilisé ces matériaux pour construire de grandes structures, telles que les thermes romains, le Panthéon et le Colisée, et ces structures existent encore aujourd'hui. Comme mélanges, ils utilisaient de la graisse animale, du lait et du sang - des matériaux qui reflètent des méthodes très rudimentaires. D'autre part, en plus d'utiliser des pouzzolanes naturelles, les Romains ont appris à fabriquer deux types de pouzzolanes artificielles - l'argile kaolin que calcinée et les pierres volcaniques calcinées - qui, avec les réalisations spectaculaires des Romains en matière de construction, témoignent d'un haut niveau de sophistication technique pour l'époque[3].

-Construit par l'empereur Hadrien de Rome et achevé en 125 après JC, le Panthéon possède le plus grand dôme en béton non armé jamais construit. Le dôme mesure 43.50 m de diamètre et a un trou de 8.5 m, appelé oculus, à son sommet, qui est à 43.5m au-dessus du sol. Il a été construit sur place, probablement en commençant au-dessus des murs extérieurs et en construisant des couches de plus en plus minces tout en travaillant vers le centre[3]. Le dôme est resté inébranlable à ce jour pendant près de 2000 ans malgré tous les tremblements de terre subis par l'installation, qui pourraient détruire non seulement le dôme mais l'ensemble de l'installation.

-Voici quelques photos d'anciens monuments archéologiques construits par les romains :



Figure1.1 : Le Colisée de Rome [4].

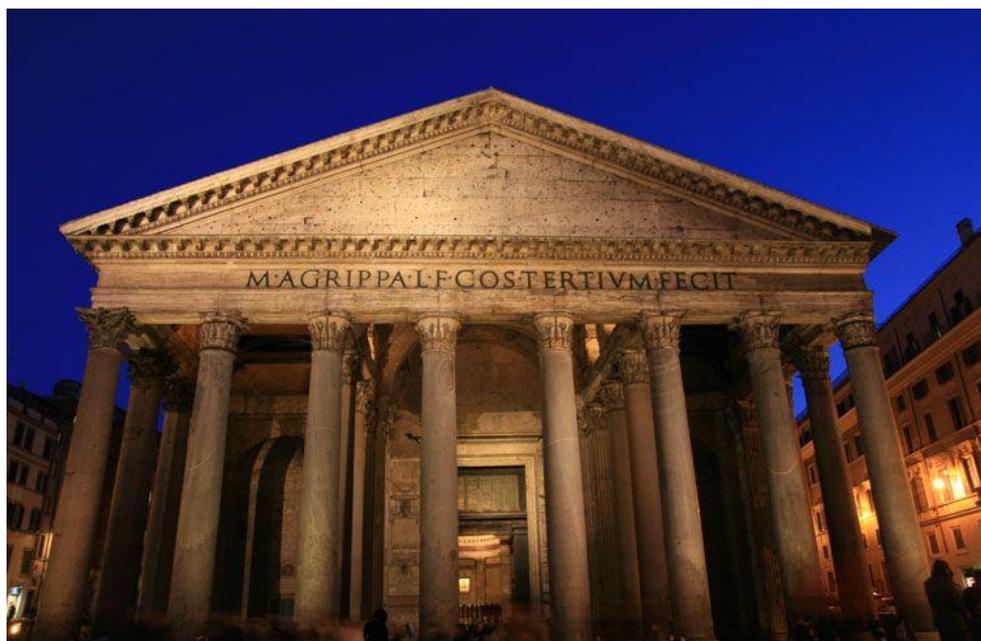


Figure1.2: Le panthéon de Rome [4].



Figure1.3 : Forum romain [5].



Figure1.4: L'arc de Trajan Timgad Algérie[6].

1.3 Les avantages et les inconvénients de béton romain :

1.3.1 Les avantages :

-Le béton romain est plus résistant que le ciment conventionnel. Le ciment romain s'est avéré parfaitement capable de conférer une résistance incroyable au contact de l'eau de mer.

-Le béton romain est plus respectueux de l'environnement car sa production n'émet pas de gaz toxiques[7].

-L'utilisation de l'eau de mer comme agent de mélange et de durcissement c'est la raison principale pour la résistance et la durabilité uniques du béton romain qui s'améliorent avec l'âge[7].

-Ce béton est moins susceptible de se fissurer sous contrainte en raison de moins d'eau dans le mélange de béton sans aciers de renforcement[7].

- Le processus de production est radicalement différent aujourd'hui. Le ciment Portland est fabriqué en chauffant de l'argile et du calcaire à haute température (divers additifs sont également ajoutés) tandis que les Romains utilisaient des cendres volcaniques et d'une quantité beaucoup plus basse de chaux chauffée à des températures plus basses que les méthodes modernes[8].

1.3.2 Les inconvénients :

-Un revers important sur le béton romain est qu'il prend plus de temps à durcir, ce qui peut être problématique pour les projets de construction[7].

-En raison de l'indisponibilité de matériaux dans le monde comme la cendre volcanique, la production de béton romain est difficile[7].

1.4 Fabrication de béton romain :

Plus de 1 500 ans après sa chute, nous nous émerveillons encore devant les réalisations de l'ancien Empire romain. Certains éléments de son patrimoine nous impressionnent autant que son cadre bâti, ou du moins ce qu'il en reste, le fait qu'ils montrent qu'ils ont fait quelque chose de bien. Surtout, ils ont fait du bien de manière concrète. La façon dont ils ont fabriqué ce matériau de construction incroyablement durable fait l'objet de recherches depuis plusieurs années, et il existe des résultats sur la façon de le faire.

-Les Romains ont fait leur béton de chaux en mélangeant la chaux à des roches volcaniques. Pour les structures sous-marines, la chaux (vive) et les cendres volcaniques ont été mélangés pour former le mortier, et ce mortier a été jetés dans des coffrages en bois avec des tufs volcaniques[9].

-L'eau de mer a immédiatement déclenché une réaction chimique exothermique. La chaux hydratée a incorporé des molécules d'eau dans sa structure et a réagi avec la cendre pour lier l'ensemble du mélange[9].

1.5 L'influence de pouzzolane sur la qualité des bétons :

1.5.1 A l'état frais :

-Les pouzzolanes améliorent l'aptitude au traitement, la plasticité, la rétention d'eau et une bonne homogénéité tout en réduisant la tendance au ressuage. Réduire la chaleur d'hydratation. Cet effet réduit considérablement la formation de fissures.

1.5.2 A l'état durci :

Les pouzzolanes améliorent la cohésion interne ainsi qu'une augmentation de compacité de la pâte de ciment. La réduction de porosité qui en découle pour toute la matrice ciment se traduit par une série d'effets très favorables [9].

- Accroissement de la résistance finale.
- Légère diminution du retrait et du fluage.
- Réduction de la perméabilité à l'eau jusqu'à des valeurs d'étanchéité.
- Amélioration de la résistance aux sulfates, aux chlorures et à d'autres types d'agressions chimiques.
- Protection des armatures contre la corrosion.
- Une réduction générale de la teneur en hydroxyde de calcium dans le béton avec deux conséquences bénéfiques.
- Une réduction notable du risque d'apparition d'efflorescences de chaux sur les faces Exposées du béton.
- Une très nette amélioration de la résistance du béton aux eaux douces.

1.6 Comparaison entre le béton romain et le ciment portland :

-Les Romains ont fabriqué leur béton en mélangeant des cendres volcaniques avec de la chaux et de l'eau de mer pour former un mortier. Ensuite, ils ont incorporé des morceaux de roches volcaniques dans ce mortier pour former l'agrégat dans le béton. La combinaison de cendres, d'eau et de chaux vive produit ce qu'on appelle une réaction pozzolanique nommée d'après la ville de Pozzuoli dans la baie de Naples. Les Romains ont eu l'idée de ce mélange en s'inspirant des gisements de cendres volcaniques qui se cimentent naturellement et qu'on connaît comme le tuf volcanique. Ce dernier est fréquent dans la région comme l'a décrit Pline.

-Le béton romain de type conglomérat a été utilisé dans de nombreuses structures architecturales incluant les marchés du Panthéon et de Trajan à Rome. Des structures maritimes massives protégeaient les ports en pleine mer et servaient d'ancrages étendus pour

les navires et les entrepôts. Le béton moderne du ciment Portland utilise également de l'agrégat de roche, mais avec une différence importante. Les particules de sable et de gravier sont conçues pour être inertes. Toute réaction avec la pâte de ciment pourrait former des gels qui augmentent et pourraient craquer le béton. Cette réaction alcali-silice se produit dans le monde entier et c'est l'une des principales causes de destruction des structures en béton du ciment Portland selon Jackson[10]

1.7 Comment l'eau de mer peut-elle renforcer le béton ?(le renforcement de béton avec l'eau de mer) :

-Le béton romain est plus résistant que le ciment classique. Il a été prouvé que le ciment romain offre une résistance incroyable au contact de l'eau de mer.

-Le béton romain est non seulement plus durable que tout ce que nous pouvons fabriquer aujourd'hui, mais il gagne également en résistance avec le temps.

- Permet à l'eau de mer de pénétrer dans le béton, favorisant la formation de nouveaux minéraux et renforçant la matrice cimentaire. Cela augmente considérablement la résistance à la rupture du béton.

- Jusqu'à présent, cette méthode est incompatible avec le ciment classique actuellement utilisé. Ce procédé favorise l'eau de mer et n'est bénéfique que pour le ciment romain[11].

1.8 Diminution de l'utilisation de béton romain :

-Le béton moderne, utilisé dans diverses structures telles que les routes, les bâtiments et les ponts, peut se détériorer en moins de 50 ans. Cependant, plus d'un millénaire après l'effondrement de l'Empire romain d'Occident, les structures en béton romain demeurent debout. Enfin, les scientifiques ont découvert la raison de cette résistance : un ingrédient spécial qui renforce le ciment au fil du temps au lieu de le fragiliser. Les chercheurs ont commencé leurs investigations en se basant sur une ancienne recette de mortier établie par l'ingénieur romain Marcus Vitruvius en 30 avant notre ère. Cette recette comprenait un mélange de cendres volcaniques, de chaux et d'eau de mer, mélangées à des roches volcaniques et versées dans des moules en bois qui étaient ensuite immergés dans de l'eau de mer. Des références à la durabilité du béton romain, y compris une note énigmatique datant de 79 avant notre ère, décrivant le béton exposé à l'eau de mer comme étant "une seule masse de pierre", ont motivé les scientifiques à poursuivre leurs recherches.

Ils ont découvert que le béton romain contenait un minéral rare appelé tobermorite d'aluminium (Al-tobermorite), connu depuis longtemps pour conférer sa résistance au béton

romain. Bien qu'il soit difficile de l'incorporer dans le béton en laboratoire, les chercheurs ont constaté que lorsque l'eau de mer pénétrait dans une matrice de ciment, elle réagissait avec les cendres volcaniques et les cristaux pour former de l'Al-tobermorite et un minéral poreux appelé phillipsite. Ces découvertes ont été publiées dans *American Mineralogist*. Ainsi, cela pourrait conduire à la construction de jetées et de brise-lames plus solides à l'avenir. Étant donné que ces minéraux prennent des siècles pour renforcer le béton, les chercheurs contemporains travaillent encore à développer une version moderne du ciment romain.

1.9 Le secret de béton romain :

Pendant des décennies, les chercheurs ont attribué la force unique du mélange à l'inclusion de cendres volcaniques de Pozzuoli, une ville de Naples en Italie, tandis que d'autres soutenaient que la chaux était l'ingrédient clé. Cependant, une équipe de chercheurs du MIT, de Harvard, d'Italie et de Suisse, dirigée par Admir Masic, professeur de génie civil et environnemental au MIT, a su qu'il y avait plus à cette histoire. En examinant de près les caractéristiques minérales blanches et brillantes à l'échelle millimétrique, appelées «clastes de chaux», incrustées dans le béton, ils ont fait une découverte majeure.

L'équipe a découvert que la force du béton de la Rome antique résidait dans ses propriétés d'auto-guérison, qui permettaient de combler les fissures au fur et à mesure de leur formation. Bien que la présence de chaux et de cendres soit bénéfique, le véritable protagoniste était le processus de création du béton, connu sous le nom de «mélange à chaud». Ce processus favorisait la formation de calcium réactif. En d'autres termes, de petits morceaux de calcaire pouvaient réagir avec l'eau après le mélange, se recristalliser sous forme de carbonate de calcium et remplir les fissures tout en réagissant avec les cendres pour augmenter la résistance. Ces réactions se produisaient spontanément, permettant de cicatriser automatiquement les fissures avant qu'elles ne se propagent.

1.10 Travaux des chercheurs sur le béton romain :

La fontaine de Trevi est alimentée par une eau d'une grande pureté, qui ne laisse pratiquement aucun dépôt de calcaire sur ses parois et est appréciée pour son goût délicat. Mais ce n'est pas tout, car en plus des qualités de l'eau elle-même, l'état impeccable du béton romain est remarquable. Les murs semblent avoir été posés hier et résistent toujours à l'eau qui coule en continu à raison de 1201 litres par seconde grâce au travail de l'ingénieur Virgo. Les anciens Romains étaient de grands bâtisseurs dotés d'une connaissance avancée en matière de béton et d'ingénierie.



Figure1.5: La canalisation pour l'alimentation de La fontaine de Trevi[12]



Figure1.6 : La fontaine de Trevi[13].

-Entendre l'eau couler dans l'aqueduc, mais vous ne pouvez pas voir de fuites d'eau ou d'usure sur les murs. C'est grâce au béton imperméabilisant romain utilisé pour construire l'aqueduc. Il était si efficace qu'après plus de deux millénaires, l'eau coule toujours comme au premier jour. C'est vraiment impressionnant de voir à quel point les ingénieurs romains étaient compétents dans la construction de structures durables et fiables.



Figure1.7 : Les aqueducs Romain[14].

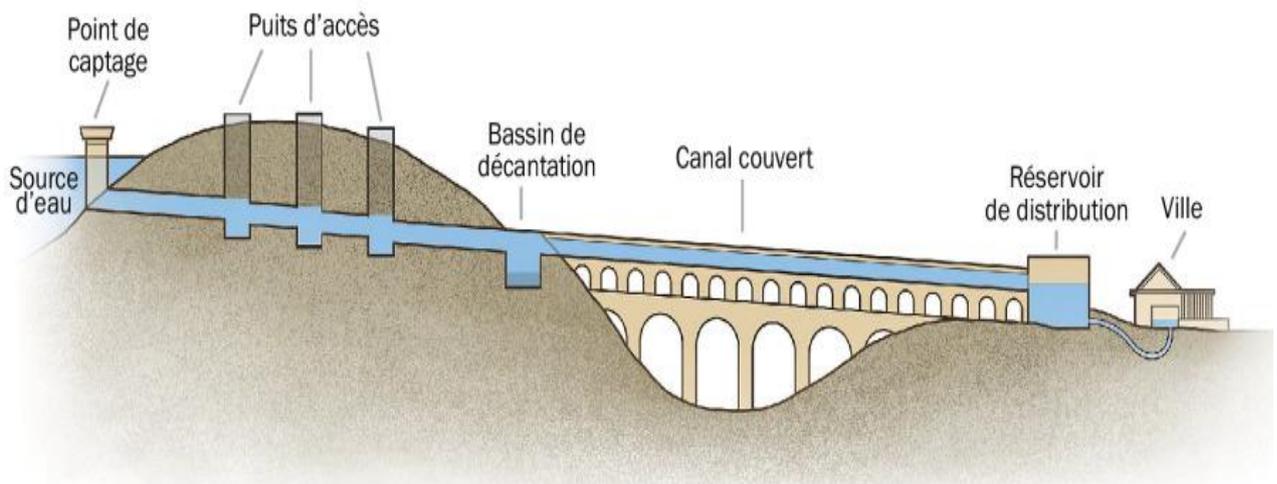


Figure1.8 : Le système de fonctionnement des aqueducs Romain[14].

-Des scientifiques américains ont récemment découvert pourquoi le béton fabriqué par les Romains était si durable. Bien que l'on ait d'abord pensé que cela était dû à la présence de pouzzolane, une pierre volcanique, des échantillons de béton romain ont été examinés à l'aide de techniques d'imagerie à très haute résolution. Les chercheurs ont remarqué des grumeaux de chaux dans le mélange, qui ont été fabriqués à partir de pierre calcaire chauffée. Les Romains ajoutaient de la chaux vive, qui, grâce à une réaction chimique, conférait au béton une capacité d'auto-guérison. Si des fissures apparaissaient dans le béton romain, elles se rebouchaient en partie grâce à cette réaction chimique avec le calcaire. En réalisant des tests, les chercheurs ont constaté que les fissures d'un bloc de béton à base de pierre volcanique et

de chaux vive pouvaient être cicatrisées en deux semaines. Les nouvelles formules de béton inspirées par cette recette romaine pourraient permettre de construire des coffrages en béton plus légers mais tout aussi solides.

-Roman Concrete: The Building Material that Lasted Millennia" par M. Jackson et al. (2013) : Cette recherche examine les propriétés et la composition du béton romain, en se concentrant sur les exemples célèbres tels que le Panthéon de Rome. Les auteurs ont étudié la composition du béton et ont suggéré que la présence de cendres volcaniques et de chaux vive en quantités spécifiques a contribué à sa longévité. L'ouvrage examine les techniques de construction et les matériaux utilisés par les Romains pour créer des structures durables, notamment des ponts, des aqueducs, des amphithéâtres et des bâtiments publics.

-Le béton romain, également connu sous le nom de "opus caementicium", était fabriqué à partir d'un mélange de chaux, de cendres volcaniques, de sable et d'eau. Il était reconnu pour sa résistance et sa durabilité exceptionnelles, ainsi que pour sa capacité à se solidifier sous l'eau.

-Le livre explore également la façon dont les Romains ont développé des techniques avancées de construction pour utiliser le béton romain dans des projets de grande envergure. Par exemple, ils ont utilisé des formes en bois pour construire des voûtes, des arches et des dômes en béton, et ils ont conçu des systèmes de coffrage pour créer des murs en béton de grande hauteur.

-En fin de compte, le livre démontre que les techniques de construction romaines ont permis la création de structures durables et impressionnantes qui ont résisté à l'épreuve du temps pendant des millénaires. Le béton romain continue d'inspirer les ingénieurs et les architectes d'aujourd'hui dans la création de structures modernes durables et résistantes.

-"Durability and Mechanical Properties of Roman Concrete with Saline and Seawater Exposure" par M. J. Silva et al. (2020) : Cette recherche étudie les propriétés mécaniques et la durabilité du béton romain exposé à l'eau de mer. Les résultats ont montré que le béton romain avait une meilleure résistance à la corrosion et une durabilité supérieure par rapport au béton moderne. L'étude "Durability and Mechanical Properties of Roman Concrete with Saline and Seawater Exposure" menée par M. J. Silva et al. (2020) a examiné les propriétés mécaniques et la durabilité du béton romain exposé à l'eau de mer. L'étude a comparé le béton romain avec du béton moderne soumis aux mêmes conditions.

-Les résultats ont montré que le béton romain avait une meilleure résistance à la corrosion et une durabilité supérieure par rapport au béton moderne. Les auteurs ont attribué cette

résistance accrue à la présence de cendres volcaniques (pouzzolane) dans le mélange de béton romain, qui réagit avec la chaux pour former une pâte de béton plus résistante.

-L'étude a également mesuré les propriétés mécaniques du béton romain et du béton moderne soumis à un environnement saline et marin. Les résultats ont montré que le béton romain avait une résistance à la compression et une résistance à la traction supérieures à celles du béton moderne, même après exposition à l'eau salée.

-En conclusion, cette étude a confirmé que le béton romain avait des propriétés mécaniques et de durabilité supérieures à celles du béton moderne dans des environnements marins. Les résultats suggèrent que la composition unique du béton romain, notamment la présence de pouzzolane, a contribué à sa résistance accrue à la corrosion et à sa durabilité.

-*"Characterisation of Ancient Roman Concrete Mortars"* par P. V. Ladeira et al. (2017) : Cette recherche a étudié les propriétés physiques et mécaniques de différents types de mortiers de béton romain, en utilisant des techniques de caractérisation avancées telles que la microscopie électronique et la diffraction des rayons X. Les résultats ont montré que le béton romain avait des propriétés mécaniques supérieures à celles des bétons modernes, en raison de sa composition et de son processus de fabrication.

1.11 L'auto-guérison au cœur du processus :

-Les experts du MIT ont découvert que les échantillons de béton romain contiennent divers types de carbonate de calcium, formés à des températures extrêmes. Ceci suggère que les Romains utilisaient de la chaux vive en plus de la chaux éteinte dans leur mélange de béton. Cette technique permettait de rendre possible des réactions chimiques qui ne l'étaient pas avec la seule chaux éteinte, ce qui permettait une prise plus rapide du béton et donc des constructions plus rapides.

-Les chercheurs ont expliqué en détail le processus qui confère au béton romain sa formidable résistance. Le mélange à chaud crée une source de calcium facile à fracturer et réactive en raison de la structure en nanoparticules des clastes de chaux. Ainsi, lorsque des fissures commencent à se former dans le béton, elles traversent préférentiellement les clastes calcaires de grande surface, ce qui permet au matériau de réagir avec l'eau et de cicatriser les fissures avant qu'elles ne se propagent. Les chercheurs ont testé leur théorie en fabriquant du béton de cette manière, en le fissurant et en y versant de l'eau. Deux semaines plus tard, les fissures étaient cicatrisées. Cependant, il reste encore à travailler sur la commercialisation de ce matériau pour réduire l'impact environnemental de la production de ciment, qui représente environ 8 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre.

- Le secret de la résistance du béton romain est découvert c'est l'eau de mer,
- Nombre de structures en béton bâties dans l'antiquité par les Romains sont toujours debout aujourd'hui. Même battues par les vagues pendant plus de 2.000 ans, elles continuent de résister à l'érosion. Mieux : elles se renforcent. Comment ? Une équipe de chercheurs américains propose une explication[12]



Figure 1.9: Forage sur une structure marine à Portus Cosanus, Toscane, 2003. Photo prise par : J. P. Oleson[2].

-Les constructions en béton de nos ancêtres romains, érigées en mer et exposées aux vagues et à l'eau salée, ont gagné en résistance et en stabilité au fil des siècles. Cela a surpris les ingénieurs modernes, dont les propres structures peuvent s'effondrer en seulement quelques décennies.

-Pour élucider ce mystère, des géologues de l'université de l'Utah ont examiné les microstructures de ce matériau qui possède une longévité incroyable. Et, à leur grande surprise, ils ont découvert que l'eau de mer qui peut traverser ces structures est responsable de la croissance de minéraux interconnectés, qui renforcent la cohésion du béton.

1.12 Béton romain : une recette à réinventer

-Le béton romain, en effet, était construit à partir de cendres volcaniques. Les composants de celles-ci sont dissous par la percolation de l'eau de mer, permettant ainsi à des minéraux comme la tobermorite ou la phillipsite de croître dans cette ambiance hautement alcaline. La

forme particulière que prennent les cristaux de ces minéraux renforce la résistance du béton à la fracture.

-Les chercheurs espèrent désormais retrouver la recette exacte du béton romain. Ou plutôt, une recette de substitution, car si les Romains pouvaient exploiter de nombreuses cendres volcaniques, ce n'est pas le cas dans le monde moderne. Quoi qu'il en soit, il faut un peu de temps au béton romain pour qu'il se renforce au contact de l'eau de mer. Néanmoins, il pourrait servir dans des contextes particuliers, comme le projet d'exploitation de l'énergie marémotrice à Swansea (Royaume-Uni) qui nécessiterait quelque 120 années d'exploitation pour devenir rentable[12].

1.13 Les propriétés de béton romain antique :

-Les architectes romains se sont inspirés de l'architecture grecque, y compris le travail innovant que les Grecs ont fait avec des arcs. L'architecture grecque, cependant, était coûteuse et lourde à créer, car elle était faite de blocs de pierre (souvent du marbre) maintenus ensemble par du mortier. Non seulement cela rendait les projets difficiles à exécuter, mais cela limitait également la taille et la portée de certains des éléments clés comme les murs et les arches.

-Le béton romain était beaucoup plus efficace à créer. Dépendant des cendres volcaniques, de la chaux et de l'eau, le béton était beaucoup moins cher en termes d'apports de matériaux et de main-d'œuvre. Le soi-disant "béton marin" fabriqué avec de l'eau de mer et un pourcentage plus élevé de chaux a créé une réaction chimique qui a produit une structure cristalline qui a résisté aux fractures. Dans l'ensemble, le béton était bon marché, léger et pouvait être coulé plutôt que sculpté.

-Le béton romain a rendu possible un certain nombre de formes architecturales différentes qui étaient impossibles ou peu pratiques en utilisant les méthodes grecques. Pour préserver l'aspect lisse des bâtiments grecs, le béton romain était souvent fini avec un parement en pierre[15].

1.14 Béton romain moderne

-Compte tenu des avantages de durabilité du béton romain, pourquoi n'est-il pas utilisé plus souvent, d'autant plus que la fabrication du ciment Portland produit d'importantes émissions de dioxyde de carbone ?

- "La recette a été complètement perdue", dit Jackson. Elle a longuement étudié les textes romains antiques, mais n'a pas encore découvert les méthodes précises pour mélanger le mortier marin, pour recréer entièrement le béton.

- "Les Romains ont eu de la chance dans le type de roche avec laquelle ils ont dû travailler", dit-elle. « Ils ont observé que les cendres volcaniques faisaient pousser des ciments pour produire le tuf. Nous n'avons pas ces roches dans beaucoup de pays, il faudrait donc faire des substitutions.

- Elle travaille maintenant avec l'ingénieur géologue Tom Adams pour développer une recette de remplacement, cependant, en utilisant des matériaux de l'ouest des États-Unis. L'eau de mer dans ses expériences provient de la marina de Berkeley, en Californie, collectée par Jackson elle-même.

- Le béton romain met du temps à développer sa résistance à partir de l'eau de mer et présente une résistance à la compression inférieure à celle du ciment Portland typique. Pour ces raisons, il est peu probable que le béton romain puisse se généraliser, mais pourrait être utile dans des contextes particuliers.

- Jackson a récemment pesé sur un projet de lagune marémotrice à construire à Swansea, au Royaume-Uni, pour exploiter l'énergie marémotrice. La lagune, dit-elle, devrait fonctionner pendant 120 ans pour récupérer les coûts engagés pour sa construction. "Vous pouvez imaginer qu'avec la façon dont nous construisons maintenant, ce serait une masse d'acier corrodé à ce moment-là." Un prototype romain en béton, en revanche, pourrait rester intact pendant des siècles.

- Jackson dit que si les chercheurs ont répondu à de nombreuses questions sur le mortier du béton, les réactions chimiques à long terme dans les agrégats restent inexplorées. Elle entend poursuivre l'œuvre de Plin et d'autres savants romains qui ont travaillé assidûment pour découvrir les secrets de leur béton. "Les Romains étaient préoccupés par cela", dit Jackson. "Si nous allons construire dans la mer, nous devrions nous en préoccuper aussi"[16].

1.15 Conclusion :

En conclusion, les recherches sur le béton romain ont permis de révéler les remarquables compétences et connaissances en matière de construction des anciens Romains. Les chercheurs ont étudié de près les compositions, les techniques de fabrication et les propriétés exceptionnelles du béton romain, telles que sa durabilité et sa résistance.

-Grâce à ces recherches, nous avons pu apprécier les avantages uniques du béton romain, tels que sa capacité à se lier avec le temps et à se renforcer au contact de l'eau, ainsi que sa capacité à résister aux éléments environnementaux et à se réparer lui-même.

-Les connaissances acquises sur le béton romain ont également inspiré de nouvelles approches et technologies dans la construction moderne. Les chercheurs et les ingénieurs ont pu développer des mélanges de béton innovants, en s'inspirant des techniques de l'Antiquité romaine, afin de concevoir des structures durables et résistantes.

-En résumé, les recherches sur le béton romain nous ont donné un aperçu précieux de l'ingéniosité et du génie civil des Romains, tout en fournissant des bases solides pour l'amélioration de la construction et de l'ingénierie des matériaux dans le monde contemporain. Ces travaux continuent de susciter l'intérêt des chercheurs et de contribuer au développement de nouvelles avancées dans le domaine de la construction durable et de la préservation du patrimoine architectural.

Chapitre II :
Caractéristiques des
matériaux utilisés

2.1 Introduction :

-Ce chapitre présente et définit diverses propriétés des matériaux entrant dans la composition et la fabrication des mortiers.

Les matériaux utilisés sont d'origine locale afin de valoriser les ressources locales algériennes :

- Le ciment à base de filler CEM III de MASCARA (GICA 42.5)
- La pouzzolane naturelle de L'ENTREPRISE NATIONALE DES GRANULATS (ENG) unité pouzzolane de BENI SAF.
- Sable siliceux (0/5).
- Eau de gâchage.
- Eau de mer.
- L'eau saturée en chaux.
- La chaux éteinte.
- Le gypse.
- L'adjuvant (plastifiant).
- Les ajouts : les fibres.

2.2 Caractéristiques des matériaux :

2.2.1 La masse volumique (NF P94-061-2) :

-C'est une caractéristique qui exprime la quantité de matière (masse) contenue dans un certain espace (unité de volume).

2.2.1.1 La masse volumique apparente :

-La masse volumique apparente est une mesure de la masse d'un matériau en vrac par unité de volume total, y compris les vides.

✓ **But :**

-Cet essai permet de déterminer la masse apparente d'un matériau, cette masse intègre les grains de l'agrégat ainsi que les vides compris entre les grains.

✓ **Mode opératoire :**

- Mesurer la quantité de l'échantillon nécessaire pour l'essai.
- Prendre un récipient et calculer son volume, peser et noter sa masse.

- Prendre le matériau dans les mains formant un entonnoir et placer les deux mains à environ 10 cm au-dessus du récipient.
- Laisser le sable s'écouler ni vite ni lentement.
- Araser avec une règle ou spatule la partie du matériau dépassant les débords supérieurs du récipient.
- Peser l'ensemble et noter les résultats.

-La formule mathématique pour calculer la masse volumique apparente est la suivante :

$$\rho = \frac{m}{v}$$

ρ : Masse volumique apparente.

M : Masse de l'échantillon.

V : Le volume total.

2.2.1.2 La masse volumique absolue :

-La masse volumique absolue également connue sous le nom de densité absolue, est une mesure de la masse d'une substance par unité de volume.

✓ **But :**

-Cet essai pour mesurer le poids volumique des grains solides qui caractérise un échantillon de sol.

✓ **Mode opératoire :**

- Peser le pycnomètre vide.
- Prendre une quantité d'un matériau sèche et verser dans le pycnomètre
- Peser de nouveau le pycnomètre (il contient de l'échantillon).
- Remplir le pycnomètre à moitié avec l'eau distillée et placer tout sur la plaque chauffante quand l'eau est portée à ébullition.
- Laisser l'eau refroidir après compléter avec l'eau distillée jusqu'à la graduation.
- Peser de nouveau le pycnomètre (il contient maintenant l'échantillon et l'eau jusqu'à la graduation).
- Vider, nettoyer et sécher le pycnomètre.
- Remplir le pycnomètre avec l'eau distillée jusqu'à la graduation.
- Peser de nouveau le pycnomètre (il contient maintenant l'eau jusqu'à la graduation).

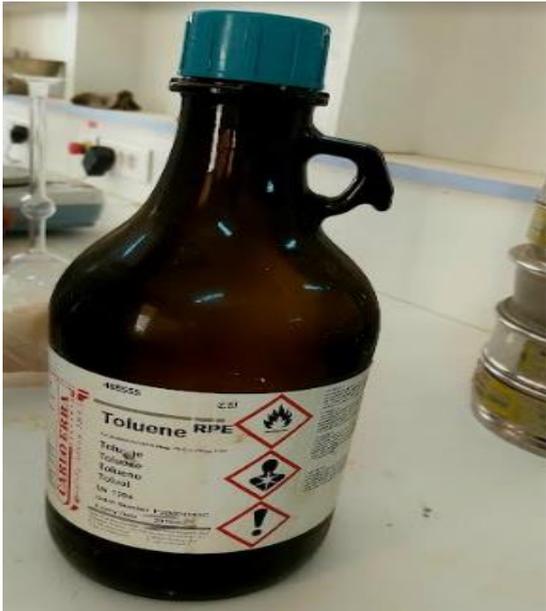


Figure 2.1 : Produit Toluène.

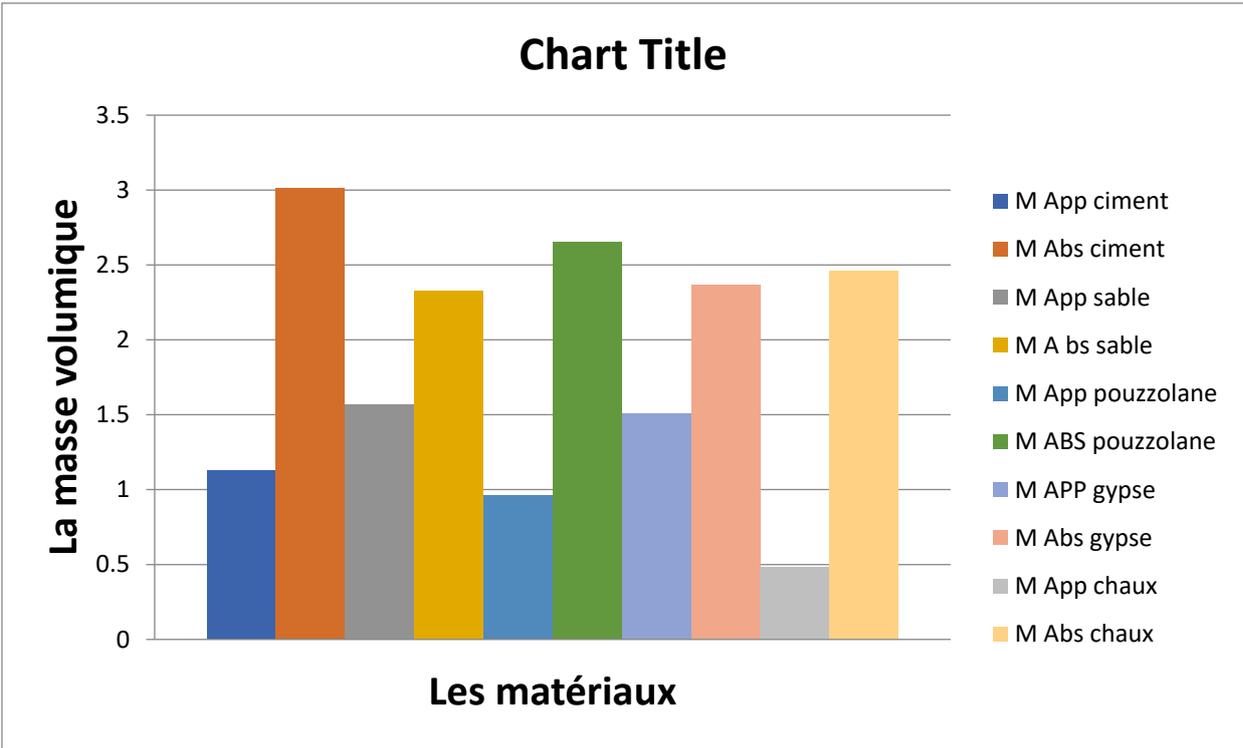


Figure 2.2: Histogramme de la masse volumique des matériaux.

2.2.2 Surface spécifique Blaine (NF EN 196-6) :

-La surface spécifique (finesse Blaine) permet de mesurer la finesse de mouture des liants .Elle est caractérisée par la surface spécifique ou surface développée totale de tous les grains contenus dans un gramme de ce liant. Elle s'exprime en cm²/g. suivant le type de liant.

-Chaque liant a une valeur approximative c'est-à-dire entre une valeur et autres.

✓ **But :**

-Le but de cet essai est déterminé le débit d'air susceptible de passer à travers la poudre.

✓ **Mode opératoire :**

- calculer la masse m de l'échantillon placé dans la cellule.
- Placer la grille au bas de la cellule. Appliquer un nouveau disque de papier filtre sur cette grille en utilisant des barres et des carrés à fond plat.
- Verser le liant dans la cellule à l'aide d'un entonnoir.
- Secouer doucement la cellule plusieurs fois pour aplatir la couche supérieure de liant.
- Appuyer doucement sur le piston pour que la poudre ne flotte pas sur le papier-filtre jusqu'à ce que le collier touche le haut de la cellule.
- Retirer le piston lentement.
- Vérifier le niveau de liquide sur le manomètre. Le niveau de liquide doit être au niveau de la ligne inférieure.
- Utiliser le ballon et aspirer lentement l'air dans le tube jusqu'à ce que le niveau de liquide atteigne la ligne supérieure.
- Arrêter quand le niveau de liquide atteint le troisième trait.
- Arrêter le chronomètre quand le niveau de liquide atteint le troisième trait.
- Noter le temps écoulé t ainsi que la température de laboratoire.
- Faire l'essai trois fois pour prendre la valeur t1, t2 et t3 et pour calculer la moyenne de « t ».

-La surface spécifique calculée par la formule suivante :

$$S = \frac{K}{mvab} \times \frac{\sqrt{e^3}}{(1-n)} \times \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{10 \times \eta}}$$

-Avec:

S:Surface spécifique Blaine.

K: Constante de l'appareil.

Mv abs: La masse volumique absolue de liant

n: Porosité en général 0,5.

t: Le temps.

η : Viscosité dynamique de l'air, à la température de l'essai.



Figure 2.3 : L'appareil de Surface Spécifique Blaine.

2.2.3 Porosité (NF 1097-4):

-La porosité c'est la propriété d'un matériau qui contient des pores ou cavités de petite taille et pouvant contenir des fluides (liquide ou gaz).[17]

✓ **But :**

-La porosité est le rapport du volume des vides au volume du matériau.

$$\rho = \frac{\text{volume des vides}}{\text{volume total}}$$

✓ **Principe:**

-L'essai consiste à saturer en eau la porosité ouverte des grains constituant le matériau granulaire.

-L'immersion du matériau dans une solution aqueuse, permet sa saturation à froid. L'essai nécessite du temps.

✓ **Mode opératoire :**

- Préparer une masse d'un échantillon sec M0.

- Placer l'échantillon dans l'eau froide et porter à ébullition pendant 2H, en vue de chasser l'air des pores et les saturer par de l'eau.
- Retirer l'échantillon de l'eau et essuyer à l'aide d'un chiffon chaque grain, peser la nouvelle masse soit M1.
- Calculer la porosité.

$$\rho(\%) = \frac{M1 - M0}{V} \text{ avec : } V = \frac{M0}{M1} \text{ donc : } \rho(\%) = \frac{M1 - M0}{M0} \times Mva \times 100$$

✓ **Les résultats :**

M0=368g.

M1=829,9g.

M vab=2,65g/cm².

$\rho=74,34\%$



Figure 2.4 Essai de Porosité.

2.2.4 L'absorption (P18-554) :

-Certains matériaux granulaires peuvent présenter une porosité interne, particulièrement préjudiciable à la résistance du béton ou mortier. En effet, la teneur en eau des granulats

provoque la fissuration du béton ou le mortier lorsqu'il est exposé à de basses températures pendant une longue période.

✓ **But :**

-Cet essai pour déterminer le coefficient d'absorption d'un matériau à partir de différentes pesées.

✓ **Principe :**

-Le coefficient d'absorption est défini comme le rapport de l'augmentation de masse de l'échantillon après absorption d'eau à la masse sèche de l'échantillon. Cette imbibition est réalisée en immergeant l'échantillon dans de l'eau pendant 24 heures.

-Le coefficient d'absorption donné par la relation suivante :

$$Ab = \frac{M0}{M1} \times 100$$

M0 : La masse de l'échantillon après séchage.

M1 : La masse de l'échantillon imbibé.

✓ **Mode opératoire :**

- Sécher l'échantillon à l'étuve pendant 24 heures.
- Prélever un échantillon de matériau sec et le peser M0.
- Placer l'échantillon dans l'eau et laisser le pendant 24h.
- Retirer de l'eau et essuyer chaque grain.
- Peser à nouveau l'échantillon : soit M1.
- Calculer le coefficient d'absorption.

M0 :368g.

M1 :420,5g.

Ab=87,51%



Figure 2.5 : L'essai d'absorption.

2.2.5 Le ciment :

-Nous avons utilisés dans notre mémoire le type de ciment GICA de haute qualité de classe CEMII/A-L 42,5N.

-Ce ciment convient pour la fabrication de mortiers et tous travaux de béton armé, développant des résistances moyennes. Il est aussi utilisé dans le secteur du bâtiment, que ce soit pour la réalisation d'habitations, d'immeubles administratifs, d'usines, d'hôpitaux et d'écoles[18].

Tableau 2.1 : Les constituants de ciment CEMIIN-L 42,5.

Les constituants de ciment	Pourcentages (%)
Clinker	80-95
Calcaire	06-20
Pouzzolane	00-05
Gypse	00-05

Tableau 2.2 : L'analyse chimique de ciment.

Analyse chimique%	Min	Max
SiO ₂	6	21
AL ₂ O ₃	4,5	5,2
Fe ₂ O ₃	2,7	3,5
CaO	58	64
MgO	0,8	1,2
K ₂ O	0,2	0,45
Na ₂ O	0,25	0,5
SO ₃	1,2	3,5
PF	5	10
Chlorures	0,02	0,1
RI	2	6
CaO libre	0,2	1,5



Figure 2.6 : Sac de ciment.

-Les résultats de la masse volumique sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau 2.3 : La masse volumique de ciment.

La masse volumique	La masse (g)		Les résultats (g/cm ³)
Apparente	Masse éprouvette (ciment)=1394,1		Gamaa1=1,1275 Gamaa2=1,1404 Gamma3=1,1216 GAMMAmoy=1,13g/cm ³
	M1=2521,6		
	M2=2534,5		
	M3=2515,7		
Absolue	M1=344,14	M2=403,47	GAMMA _s =3,01g/cm ³
	V1=0,1	V2=20,2	



Figure 2.7: La masse volumique apparente de ciment.



Figure 2.8 : La masse volumique absolue de ciment.

-Le tableau suivant représente les caractéristiques physiques de ciment :

Tableau 2.4: Les caractéristiques physiques de ciment.

Les caractéristiques physiques	Valeurs
La masse volumique apparente (g/cm ³)	1,13g/cm ³
Ma masse volumique absolue (g/cm ³)	2,95g/cm ³
Surface spécifique Blaine (cm ² /g)	4369,73cm ² /g

2.2.6 Le sable :

-Le sable utilisé est un sable de mer, provenant de la wilaya d'Ain TEMOUCHENT exacte plage des mouches ses caractéristiques sont les suivantes :

-C'est une caractéristique qui exprime la quantité de matière (masse) contenue dans un certain espace (unité de volume).



Figure 2.9: La masse volumique Apparente de sable.



Figure 2.10 : La masse Absolue de sable.

-Les résultats de la masse volumique sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau 2.5 : La Masse Volumique de Sable.

Masse volumique	La Masse (g)	Les résultats (g/cm ³)
Apparente	Masse éprouvette (sable)=1397,99g	Gamma1=1,569 Gamma2=1,5793 Gamma3=1,5697 GAMMA Moy=1,57g/cm ³
	M1=2966,9g	
	M2=2977,2g	
	M3=2965,6g	

Absolue	M1=83,9g	M2=110,5g	GAMMA s=2,33g/cm ³
	M3=347,5g	M4=323,3g	

2.2.6.1 Analyse granulométrique (EN933-2) :

-L'essai consiste à trier les différents grains qui composent l'échantillon à l'aide d'une série de tamis empilés aux dimensions d'ouverture décroissantes de haut en bas. Le matériau analysé est placé dans le tamis supérieur et la classification des particules est obtenue en faisant vibrer toute la colonne de tamis.

✓ **But :**

-Cet essai mesure la distribution granulométrique des particules formant des agrégats de dimensions comprises entre 0,063 et 5 mm.

✓ **Mode opératoire :**

- mesurer la masse des tamis vides.
- préparer une quantité de sable de 1000 g.
- verser le sable dans les tamis qui sont placés sur l'appareil de vibration pendant 5 min, il y aura un passage selon le diamètre des tamis.
- enlever chaque tamis et mesurer sa masse.
- calculer le pourcentage de refus de chaque tamis.



Figure 2.11 : Essai d'Analyse granulométrique.

-Les résultats de l'analyse granulométrique du sable sont montrés dans les tableaux dessus :

Tableau 2.6: Résultats d'Analyse granulométrique de sable des mouches.

Tamis	Mr par	Mr cum	%R cum	Tamisât	%Tamisât
5	0	0	0	1000	100
4	0	0,4	0	1000	100
2	15,8	15,8	1,58	984,2	98,42
1	818,8	834,6	83,46	165,4	16,54
0,5	121,9	956,5	95,65	43,5	4,35
0,250	42,7	999,2	99,92	0,8	0,08
0,125	0,5	999,7	99,97	0,3	0,03
0,063	0,1	999,8	99,98	0,2	0,02
Fond	0	999,8	99,98	0,2	0,02

Tableau 2.7: Résultats d'analyse granulométrique de sable de correction.

Tamis	Mr par	Mr cum	%R cum	Tamisât	%Tamisât
5	0,1	0,1	0,01	999,9	99,99
4	1,4	1,5	0,15	998,5	99,85
2	107	108,5	10,85	891,5	89,15
1	10,8	119,3	11,93	880,7	88,07
0,5	84,4	203,7	20,37	796,3	79,63
0,250	396,3	600	60	400	40
0,125	200,6	800,6	80,06	199,4	19,94
0,063	24,2	874,8	87,48	125,2	12,52
Fond	11,1	885,9	88,59	114,1	11,41

Mr par : Masse des refus partielle.

Mr cum : Masse des refus cumulés.

%R cumu: Pourcentage refus cumulé.

2.2.6.2 Module de finesse :

-Le module de finesse (Mf) est un calcul très important qui permet de juger la qualité du sable utilisé et il est donné par la relation :

$$M_f = \frac{\sum R_i}{100}$$

-La séries des tamis (0,125 ; 0,250 ; 0,500 ; 1 ; 2 ; 4).

$$MF = \frac{0 + 1,58 + 83,46 + 95,65 + 99,92 + 99,97}{100}$$

MF=3,8 (sable plage des mouches).

$$MF = \frac{0,15 + 10,85 + 11,93 + 20,37 + 60 + 20,06}{100}$$

MF=1,8 (sable de correction).

-Donc notre sable utilisé est selon le module de finesse est:

- Grossier → sable des mouches.
- Fin → Sable de correction.

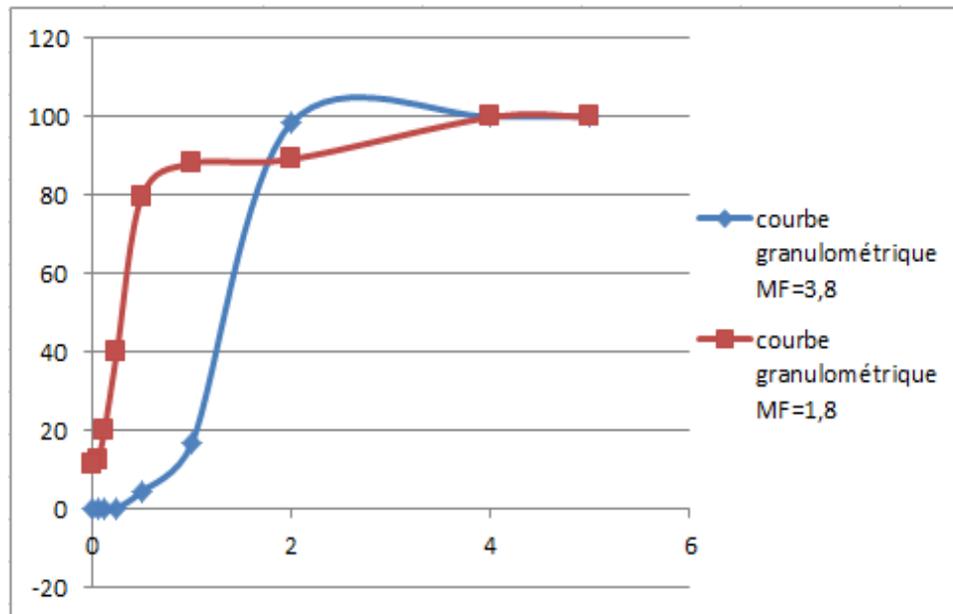


Figure 2.12 : Courbe granulométrique de sable.

2.2.6.3 Essai d'équivalent de sable (P18-598):

-L'essai consiste à mesurer la propreté des sables entrant dans la composition des mortiers et bétons et pour séparer les floccules fins contenues dans le sable.

-On utilise Une procédure normalisée permet de déterminer un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté de celui-ci.

✓ **But :**

-Déterminer et mesurer la propreté du sable utilisé.

✓ **Mode opératoire :**

- Remplissage de la solution lavant jusqu'au premier trait.
- Peser quantité de 120g de sable à l'aide d'un entonnoir.
- Laisser le sable et la solution reposer pendant 10 min.
- Utiliser l'appareil agitatrice électrique pour agiter pendant 30 seconds.
- Lavage du sable avec la solution jusqu'au le trait supérieur.

- Imbibition du sable pendant 20 min.
- Après 20 min mesurer la hauteur h_1 et la hauteur de sable h_2 au piston.

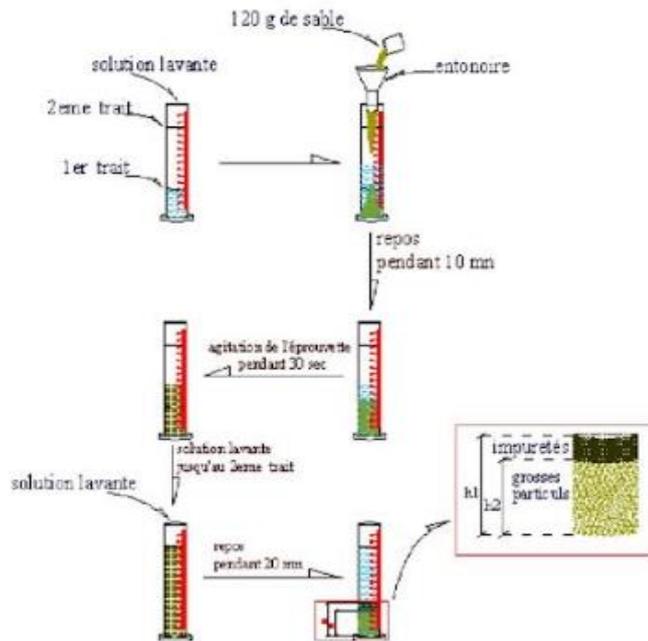


Figure 2.13 : Schéma de détermination l'équivalent de sable[19].



Figure 2.14 : Essai Equivalent de Sable.

Tableau 2.8: Résultat d'équivalent de sable.

Matériaux	Valeurs (ml)	Equivalent de sable(%)
L'eau	H1=8,6ml	96,63%
Sable	H2=8,9ml	

-Donc notre sable est un sable très propre.

-Le tableau suivant représente les caractéristiques physiques de sable :

Tableau 3.9 : Les caractéristiques physiques de sable des mouches.

Les caractéristiques physiques	Valeurs
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1,57
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2,33
Equivalent de sable (%)	96%

2.2.7 La pouzzolane :

-La pouzzolane c'est le matériau qui remplace le ciment dans nos essais et on utilise avec des grands pourcentages.



Figure 2.15 : Pouzzolane naturelle.

2.2.7.1 L'analyse chimique de pouzzolane naturelle :

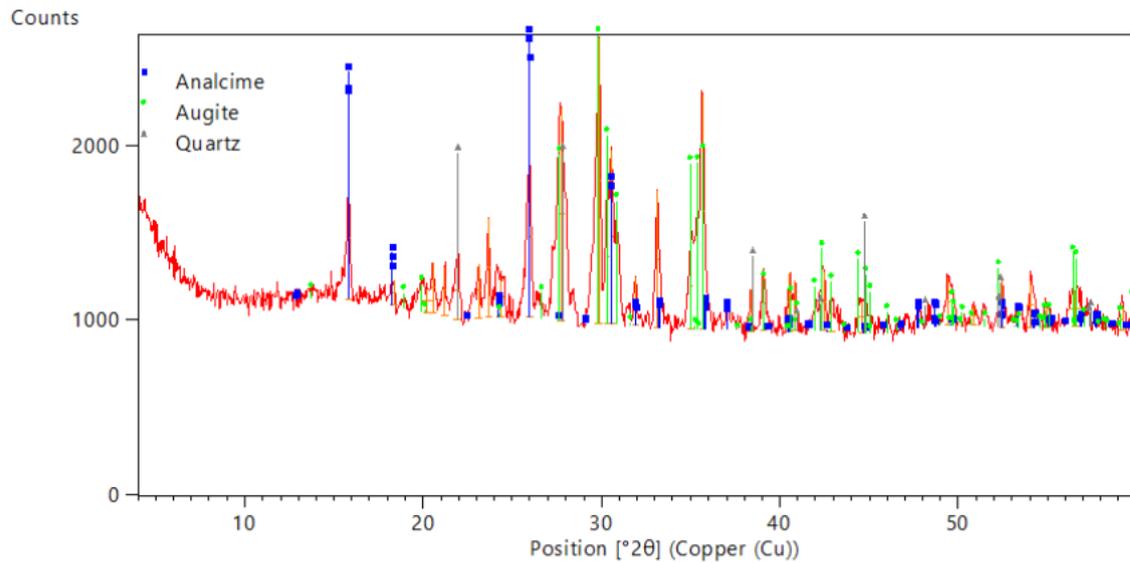


Figure 2.16 : Diffraction aux rayons X de la pouzzolane.

2.2.7.1 L'analyse chimique de pouzzolane naturelle :

Tableau 3.10 : Caractéristiques chimique de pouzzolane.

Les composants	Pourcentages(%)
SiO ₂	45,61 - 45,67
Al ₂ O ₃	18,62 – 19,64
Fe ₂ O ₃	10,03 – 10,35
CaO	8,66 – 10,57
MgO	3,73 – 4,06
SO ₃	0,01
K ₂ O	1,01 – 2,45
Na ₂ O	1,87 – 4,63
P ₂ O ₅	0,77 – 0,81
TiO ₂	2,17 – 2,27
Pf	2,70 – 6,14

2.2.7.2 Séchage de pouzzolane :

Le séchage fait au niveau de laboratoire de l'université dans une étuve a (..)°C :



Figure 2.17: Etuve.

2.2.7.3 Broyage de la pouzzolane :

-Le broyage se fait en utilisant le concasseur au niveau de notre laboratoire de génie civil.



Figure 2.18: Broyage et préparation de pouzzolane.

2.2.7.4 Tamisage de la pouzzolane :

-On a utilisé l'appareil de Micro DEVAL, après on a fait le tamisage à l'aide des tamis de diamètre 125mm et 80mm



Figure 2.19 : Appareil de MICRO DEVAL et Tamiseuse.

-Les résultats de la masse volumique sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau 3.11 : La Masse volumique de Pouzzolane.

Masse volumique	La masse(g)	Les résultats (g/cm ³)
Apparente	Masse récipient (pouzzolane)=1394,1g	Gamma1= 0,972 Gamma2= 0,9614 Gamma3=0,9705 GAMMAmoy=0,96g/cm ³
	M1=2366,1g	
	M2=2355,5g	
	M3=2364,6g	

Absolue	M1=176,9g	M2=202,7g	GAMMA s=2,65g/cm ³
	M3=458,5g	M4=442,4g	



Figure 2.20 : La masse volumique apparente de Pouzzolane.



Figure 2.21: La masse volumique absolue de pouzzolane.

2.2.7.5 Les caractérisations techniques de pouzzolane :

-Le tableau suivant représente les caractéristiques physiques de pouzzolane :

Tableau 3.12: Les caractéristiques physiques de pouzzolane.

Caractéristiques physiques	Les valeurs
Masse volumique apparente (kg/cm ³)	0,96g/cm ³
Masse volumique absolue (kg/cm ³)	2,65g/cm ³
Surface spécifique Blaine (cm ² /g)	4404,025cm ² /g
Pouzzolanité (%)	
Porosité (%)	74,34%
Humidité (%)	15%
Absorption (%)	87,51%

2.2.8 Gypse :

-L'ajout de gypse pour but de contrôler le durcissement des pouzzolanes, en particulier celles contenant des niveaux importants d'aluminate tricalcique. Grâce à ce gypse, le durcissement de la pouzzolane, c'est-à-dire le début du durcissement, se produit le plus tôt possible après le début de l'hydratation.



Figure 2.22 : Le Gypse.

-Les résultats de la masse volumique sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau 3.13 : La masse volumique de Gypse.

Masse volumique	La masse (g)		Les valeurs (g/cm ³)
Apparente	Masse récipient vide (gypse)=1397,9g		Gamma1=1,5306 Gamma2= 1,5165 Gamma3=1,5079 GAMMAmoy=1,51g/cm ³
	M1=2928,5g		
	M2=2914,4g		
	M3=2905,8g		
Absolue	V1=0,2	V2=21,6	GAMMA s=2,37g/cm ³
	M1=347,3	M2=398,2	



Figure 2.23: La masse volumique absolue de gypse.



Figure 2.24 : La masse volumique apparente de gypse.

-Le tableau suivant représente les caractéristiques physiques de gypse :

Tableau 3.14 : Les caractéristiques physiques de gypse.

Caractéristiques physiques	valeurs
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1,51g/cm ³
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2,37g/cm ³
Surface spécifique Blaine (cm ² /g)	2997,89cm ² /g

2.2.9 La chaux :

-La chaux est l'un des matériaux les plus anciens, mais c'est aussi l'un des matériaux les plus importants que l'humanité a été utilisée, selon sa composition on peut obtenir des mélanges compacts utiles dans les ouvrages de génie civil tels que les mortiers.

2.2.9.1 L'analyse chimique de chaux :

Tableau 3.15: Caractéristiques chimique de chaux.

Les composantes	Les teneurs(%)
CaCO ₃	62
Fe ₂ O ₃	31
Fe ₂ O ₃	30
Si	27
Cu ₅ FeS ₄	25
CaF ₂	22
NaErF ₄	20
Al ₂ O ₃	13
Cr	4
SiO ₂	2
UO ₂	0
PrO _{1.83}	0

.

-Les résultats de la masse volumique sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau 3.16 : La masse volumique de Chaux.

La masse volumique	La masse (g)		Les valeurs (g/cm ³)
Apparente	Masse récipient vide (la chaux)=1394,1g		Gamma1= 0,4931 Gamma2= 0,4828 Gamma3=0,4891 GAMMAmoy=0,48g/cm ³
	M1=1887,2g		
	M2=1876,9g		
	M3=1883,2g		
Absolue	V1=0,1	V2=22,7	GAMMA S=2,46g/cm ³
	M1=348	M2=406,1	



Figure 2.25 : La masse volumique apparente de chaux.

-Le tableau suivant représente les caractéristiques physiques de chaux :

Tableau 3.17 : Les caractéristiques physiques de chaux.

Caractéristiques physiques	Les valeurs
Masse volumique apparente (g/cm ³)	0,48g/cm ³
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2,46g/cm ³
Surface spécifique Blaine (cm ² /g)	6725cm ² /g

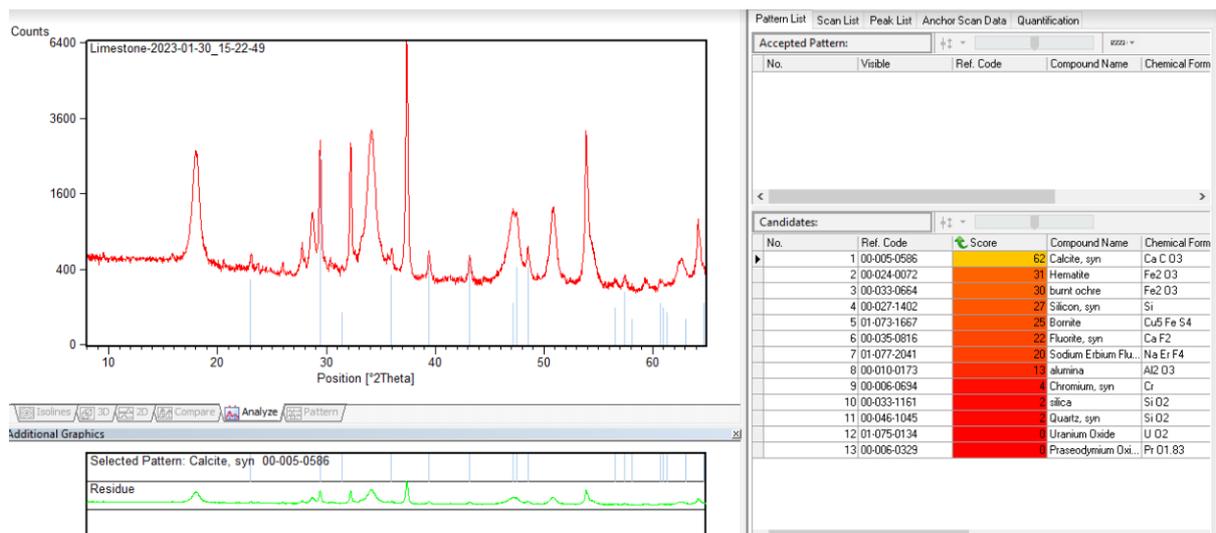


Figure 2.26 : Caractéristiques chimiques de chaux.

2.2.10 L'eau de gâchage :

-L'eau utilisée pour le mortier est l'eau du robinet, distribuées par le réseau public de la ville d'AIN TEMOUCHENT.

2.2.10.1 L'analyse chimique de l'eau potable :

Tableau 3.18 : Caractéristiques chimique de l'eau potable.

Les composantes	Ca	Na	K	Cl	SO4	NO3	PH	T(°C)	Mg
Les teneurs	37,7	145,05	11,06	203,85	25,50	1,29	25,50	24,3	23,7

2.2.11 L'eau de mer :

-L'eau utilisée pour la préparation des mortiers et la conservation des éprouvettes c'est l'eau de mer de plage des mouches.

2.2.11.1 L'analyse chimique de l'eau de mer :

Tableau 3.19 : Caractéristiques chimiques de l'eau de mer.

Les composantes	Ca	Mg	Cl	SO4	CO3	HCO3
Les teneurs%	521,4	1458	23075	2859,10	9	268,48

2.2.12 L'adjuvant :

- L'emploi de l'adjuvant utilisé dans ce travail a pour but de faciliter sa mise en forme et modifie l'ouvrabilité du béton ou mortier.

2.2.12.1 Plastifiant :

-La fonction principale de ces adjuvants est de réduire la teneur en eau du béton tout en conservant la même maniabilité conduisant à une résistance mécanique accrue. Ils permettent également d'augmenter la plasticité du béton à teneur en eau constante, facilitant ainsi sa mise en œuvre.



Figure 2.27: Plastifiant.

2.2.13 Les fibres :

-Les fibres se sont des ajouts dans le béton ou le mortier, son rôle principal est de maîtriser la fissuration et de reprendre les efforts au droit des fissures éventuelles.

Les fibres utilisées dans la fabrication de mortier de notre étude se sont les fibres polypropylène.

2.2.13.1 Les fibres polypropylène :

-Les fibres de polypropylène réduisent la formation de fissures de retrait dans le béton et le mortier, augmentant ainsi la résistance aux chocs.



Figure 2.28 : Les fibres polypropylène.

2.3 Conclusion :

-Durant toutes les étapes de réalisation de ce travail qui permet de juger la qualité des matériaux choisis et utilisés. La connaissance de différentes caractéristiques principales physique des matériaux nous facilite le choix des dosages pour pouvoir fabriquer un mortier de qualité et nous aident par la suite et d'une façon significative de commenter et d'argumenter les résultats des essais mécaniques.

Chapitre III :
Confection des
mortiers et essais
mécaniques

3.1 Introduction :

-Après la discussion des différentes caractéristiques des matériaux utilisées dans la fabrication des mortiers Ce chapitre est consacré sur la méthode de préparation des éprouvettes des mortier et à la formulation de différentes variantes développées avec la pouzzolane, en comparant celle-ci avec un échantillon de mortier témoin (sans additif) et les résultats d'essais physico-mécaniques, c'est-à-dire (ultrason, conductivité thermique, absorption, flexion et résistance mécanique en compression) obtenus après avoir testé les différentes variantes étudiées.

3.2 Formulation des mortiers :

-Les mortiers confectionnés ce sont des mortiers avec des moules prismatiques (4×4×16) et préparés à base de ciment et l'autre à base de pouzzolane.



Figure 3.1: Fabrication des mortiers.

3.2.1 Mortier ordinaire (témoin) :

-Nous avons confectionné deux mortiers de référence (sans additions) dont la composition est inspirée de celle du mortier normal défini par la norme (!!)

-La différence entre les deux mortiers réside dans le type d'eau, donc les mortiers fabriqués dans cette étape seront nommés par :

- MTEP: Mortier témoin préparé par l'eau potable.
- MTEM: Mortier témoin préparé par l'eau de mer.

-Le rapport E/C et la quantité d'adjuvant du type plastifiant ont été ajustés expérimentalement pour obtenir une consistance de référence normale et ne pas affecter la stabilité de l'échantillon.

-Les compositions des matériaux sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau 3.1: Compositions massiques des mortiers témoins.

Mortier	Ciment(g)	Sable(g)	E/C	Eau (ml)
MTEP	450	1350	0,5	225
MTEM	450	1350	0,5	225



Figure 3.2: Mortier ordinaire témoin.

3.2.2 Mortier à base de pouzzolane :

-La deuxième étape, consiste à remplir une quantité de pouzzolane selon les pourcentages suivants (90%, 85% et 70%) Avec une quantité de chaux selon les pourcentages suivants aussi (10%, 15%et 30%). Ce travail a été fait par la pouzzolane de l'entreprise de BENI SAF(ENG) avec le sable, l'eau de mer, l'eau de gâchage, gypse et l'adjuvant de type plastifiants. Les mortiers fabriqués dans cette étape ont été nommés par : MEG, MEM et MEC+ la date de la fabrication . Ils sont composés respectivement de (10% ; 20% ; 30% ; 35% et 40%) de pouzzolane.



Figure 3.3: Mortier à base de pouzzolane et chaux.

Tableau 3.2 : Compositions des mortiers à divers pourcentages de pouzzolane.

Désignation du mortier	Sable (g)	L'eau (ml)	Pouzzolane (g)	La chaux (g)	L'adjuvant (ml)	Gypse (g)
MPEM (%A)	1350	225	405	45	4,5	/
MPEP (%A)	1350	225	405	45	4,5	/
MPEM(%B)	1350	225	382,5	67,5	6,75	/
MPEP(%B)	1350	225	382,5	67,5	6,75	/
MPEM(%E)	1350	225	315	135	6,75	22,5
MPEP(%E)	1350	225	315	135	6,75	22,5

- **MPEM (%A)** : Mortier pouzzolane préparé par l'eau de mer pourcentage A.
- **MPEP (%A)** : Mortier pouzzolane préparé par l'eau potable pourcentage A.
- **MPEM (%B)** : Mortier pouzzolane préparé par l'eau de mer pourcentage B.
- **MPEP (%B)** : Mortier pouzzolane préparé par l'eau potable pourcentage B.
- **MPEM (%E)** : Mortier pouzzolane préparé par l'eau de mer pourcentage E.
- **MPEP (%E)** : Mortier pouzzolane préparé par l'eau potable pourcentage E.

3.2.3 Mortier à base de pouzzolane et des fibres :

-La troisième étape consiste à remplacer la masse de ciment par un mélange des fibres et de la pouzzolane. Les pourcentages d'utilisation sont (90%, 85%, 70%). Les mortiers créés à cette étape sont nommés par : MPF1, MPF2.

-Les compositions de cette étape sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau 3.3 : Compositions des mortiers à base de pouzzolane et des fibres.

Mortier	Sable (g)	L'eau (ml)	Pouzzolane (g)	La chaux (g)	L'adjuvant (ml)	Gypse (g)	Fibres (g)
MPF1	1350	225	315	135	/	22,5	9
MPF2	1350	225	315	135	8,5	22,5	9

➤ **P** : Désigne la pouzzolane.

➤ **F** : Désigne les fibres.

- L'augmentation du dosage de l'adjuvant vise à maintenir une bonne consistance du mortier.

3.3 Préparation des mortiers :

-Préparer chacun des ingrédients avec le bon dosage. Il suffit juste de verser dans des bacs la quantité exacte de chaque matériau.

-Remplissez d'abord la cuve du malaxeur avec de l'eau, puis mettez le ciment ou la pouzzolane et la chaux et démarrez le malaxage à basse vitesse pendant 30s.

-Introduire le sable régulièrement pendant les 30 s suivants avec une vitesse lente aussi.

-Ensuite, tournez le malaxeur à haute vitesse et continuez à mélanger pendant 30 secondes supplémentaires.

-Arrêtez le mélangeur pendant 1 minute 30 secondes. Pendant les 15 premières secondes, utilisez la raclette pour faire glisser le mortier des parois et du fond du récipient vers le centre.

-Enfin, continuez à malaxer avec une vitesse rapide pendant 60 secondes.



Figure 3.4: Malaxeur.

3.4 Préparation des éprouvettes :

-Préparer les moules aux dimensions appropriées de 40 x 40 x 160 mm en utilisant une quantité appropriée de mortier.

-Huiler les moules et vérifier leurs serrages.

-Placer les moules sur une table vibrante.

- Remplir le moule de mortier et couler en 3 couches.

- Compacter le mortier à l'aide d'une table chocs. Il faut qu'elle soit bien arasée à l'aide d'une règle métallique et placée lentement sur la face du moule.

-Maintenir le moule dans l'humidité jusqu'au démoulage.

-Emballer les éprouvettes du mortier avec papier cellophane et papier aluminium.

- Démoulage des moules 48h pour le ciment et 3 jours pour la pouzzolane après fabrication
Stockage des éprouvettes.

-Mettez-les dans un bain-marie ($t=25^{\circ}\text{C}$).



Figure 3.5 : Les éprouvettes de mortier à l'état frais.



Figure 3.6 : Les éprouvettes dans un bain-marie.

3.5 Conservation des éprouvettes :

-Immersion immédiate de l'échantillon marqué de manière Horizontale ou verticale dans l'eau à $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ dans des bacs.

- Si l'échantillon est stocké horizontalement, la surface de pression, qui est verticale lors du moulage par compression, doit rester verticale et le côté horizontal doit être orienté vers le haut. Séparez-les afin que l'eau puisse atteindre les spécimens sans entrave. Pendant le stockage, la couche d'eau entre les échantillons ou les couvercles ne doit pas être inférieure à 5 mm.



Figure 3.7: Marquage des éprouvettes.



Figure 3.8: Conservation des éprouvettes.

3.6 Les essais sur mortier à l'état durci :

3.6.1 Ultra son :

-Le contrôle par ultrasons est une méthode non destructive de contrôle de l'homogénéité du mortier. Il consiste à mesurer la vitesse de propagation des impulsions ultrasonores et permet de tester in situ la résistance du béton. Cette méthode permet de mesurer le temps de transit d'une impulsion ultrasonore à travers le mortier. Les principales

caractéristiques de tous les appareils disponibles sur le marché sont très similaires. Ces dispositifs comprennent des générateurs d'impulsions et des récepteurs d'impulsions.

-Comme toutes les méthodes d'inspection non destructives, l'inspection par ultrasons permet de caractériser les défauts contenus dans les structures et d'évaluer l'acceptabilité des pièces fabriquées sans affecter l'intégrité structurelle. Cette méthode peut être utilisée à différentes étapes du développement de l'ouvrage considéré (fabrication, mise en service, réparation). Il ne quantifie pas l'erreur, mais nécessite une comparaison avec des normes. De plus, la limite et la probabilité de détection diffèrent selon l'équipement, le matériau, la surface d'inspection et l'opérateur.

✓ **But :**

-Le but de cet essai est de mesurer la vitesse de propagation des ondes longitudinales à travers des éléments en béton ou mortier.

✓ **Principe :**

-Le principe de cette méthode est de mesurer le temps mis par une onde longitudinale (onde de pression) pour se propager sur une certaine distance et, par conséquent, la vitesse de propagation correspondante de cette onde dans le béton ou le mortier.

✓ **Description de l'appareil ultra son :**

-Un dispositif d'auscultation dynamique génère une impulsion ultrasonore, qui est émise lorsque l'ultrason touche la zone à évaluer. Le temps nécessaire pour traverser le mortier est visualisé sur un afficheur digital.



Figure 3.9: Appareil de l'ULTRASON.

✓ **Mode opératoire :**

- Pour la mise en route de l'appareil il faut :
- Assurez-vous que les piles sont installées correctement.
- Connecter les deux transducteurs, qui peuvent être indifféremment émetteur et transducteur, avec deux câbles.
- Allumez l'appareil avec un interrupteur.
- L'appareil est maintenant prêt pour le test livraison.
- Choisissez une surface d'essai de préférence lisse et exempte de fissures. Appliquer une fine couche de produit de couplage sur chaque transducteur.
- Placer et appuyer les transducteurs sur la surface. L'opérateur déplacera légèrement les sondes en maintenant la pression pour obtenir la valeur stable la plus faible, qui sera considérée comme valeur à retenir.

✓ **Les résultats :**

-La vitesse de propagation est déterminée par la formule suivante :

$$V = \frac{S}{T}$$

-Avec :

- **V** : La vitesse de propagation du son en (m/s).
- **S** : Distance entre les têtes en (m).
- **T** : Le temps que met l'impulsion pour parcourir la longueur en (μ s).

3.6.2 Essai d'absorption d'eau :

-L'absorption capillaire mesure l'absorption d'eau due à l'effet de mèche capillaire d'échantillons de mortier insaturé en contact avec de l'eau sans pression hydraulique.

✓ **But :**

-Cet essai pour déterminer le coefficient d'absorption des différentes éprouvettes des mortiers.

✓ **Principe:**

-Le coefficient d'absorption est défini comme le rapport de l'augmentation de masse de l'échantillon après absorption d'eau à la masse sèche de l'échantillon. Cette absorption est

réalisée en immergeant les échantillons dans de l'eau à 24°C pendant 5 minutes, 10 minutes, 18 heures et 24 heures.

-Le coefficient d'absorption d'eau définie par la relation suivante :

$$Ab = \left(\frac{Ma - Ms}{Ms} \right) \times 100$$

-Avec :

- **Ms** : Masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve à 105 °C.
- **Ma** : Masse de l'échantillon imbibé, surface sèche déterminée comme suit.

✓ **Mode opératoire :**

- Mesurer la masse des éprouvettes avant l'essai.
- Elles sont placées sur des supports adéquats dans un bac plein d'eau.
- La face clivée de l'éprouvette est immergée dans 5 à 10 mm d'eau pendant une durée spécifique.
- Laissez les éprouvettes dans l'eau à temps de 5 min; 10 min; 18hs et 24 h.
- Prenez les éprouvettes et mesurer la masse après le temps précisé.
- Calculer le coefficient d'absorption.



Figure 3.10: Essai d'absorption par capillarité.

3.6.3 Essai de conductivité thermique :

-La conductivité thermique (parfois aussi appelée conductibilité thermique) est une grandeur physique qui caractérise la capacité d'un matériau à conduire la chaleur. Son unité de mesure est "lambda" (symbole λ).

- Ce Coefficient représentant la quantité de chaleur diffusée par conduction.

-L'unité de lambda est exprimé en W/m.K, c'est-à-dire en Watt par mètre-Kelvin.

✓ **But :**

-Cet essai est pour but de vérifier la loi de conduction et déterminer la conductivité thermique d'un matériau conducteur.

✓ **Principe :**

-Le principe de ce test est d'associer un élément chauffant et un capteur de température (tous deux reliés à la même sonde) pour mesurer l'échauffement subi par le capteur pendant une période de chauffe choisie par l'utilisateur en fonction du matériau.

✓ **Description de l'appareil :**

-Cet appareil est une sonde qui permet de mesurer les propriétés thermique de n'importe quel milieu.

-3 capteurs fournis avec la sonde permettent d'ajuster les mesures en fonction du milieu étudié.

-Le principe de la méthode est de mesurer la température de l'échantillon en fonction du temps. A partir de ces résultats, la conductivité, la résistivité, la diffusivité thermique et la chaleur spécifique du milieu sont obtenues.

-L'appareil est livré dans une valise de transport comprenant :

- Le boîtier principal.
- 3 sondes.
- 1 appui pour le boîtier.
- 1 câble RS232 pour la connexion avec 1 pc.
- 2 barres étalons.
- 1 flacon de glycérine.
- 1CD d'installation pour le logiciel KD2 pro utility.



Figure 3.11: Appareil de conductivité thermique.

✓ **Mode opératoire :**

- Prendre les éprouvettes de mortier.
- Faire deux trous l'un à proximité de l'autre avec des mèches de diamètre 2 mm.
- Appliquer le capteur de la sonde sh-1 sur les 2 trous de l'éprouvette.
- L'appareil affiche les valeurs de K, C, D, T et ρ .

3.7 Caractéristiques mécaniques des éprouvettes :

-Pour déterminer la résistance à la flexion, utilisez la méthode de chargement ponctuel au milieu de la portée à l'aide d'un équipement de flexion standard. Un demi-prisme obtenu lors d'un essai de flexion doit exercer un effort de compression sur le côté de la pièce moulée sous une section de 40 mm x 40 mm.

3.8 Les essais mécaniques sur les éprouvettes :

3.8.1 Résistance à la traction par flexion (NFP18-407) :

-La machine utilisée est la machine de flexion trois points (deux appuis avec une force concentrée appliqué au milieu).

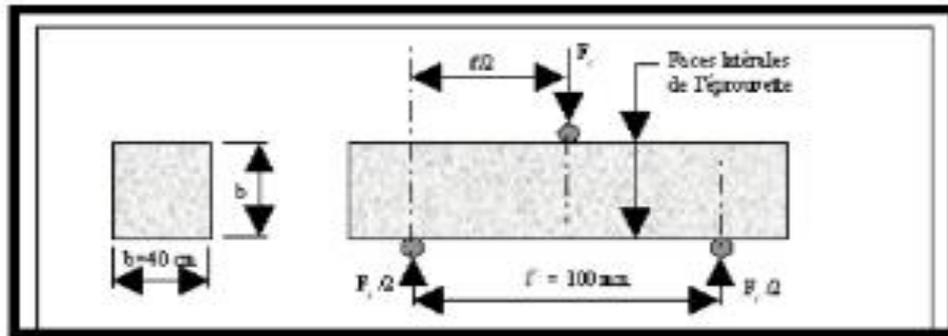


Figure 3.12: Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion.

-Si P est la charge de rupture de l'éprouvette en flexion, le moment de rupture vaut $P l/4$ et la contrainte de traction correspondante sur la face inférieure de l'éprouvette.

-Rf (en N/mm²) est calculée au moyen de la formule :

$$R_f = 1,5 \times \frac{p \times l}{b^3}$$

-Avec :

- **Rf** : La résistance en flexion, en newtons par millimètre carré ou en MPA.
- **b** : Le côté de la section carrée du prisme en (mm).
- **P** : La charge appliquée au milieu du prisme à la rupture en (N).
- **L** : La distance entre les appuis en (mm).

-La photo en dessous représente l'appareil de flexion :

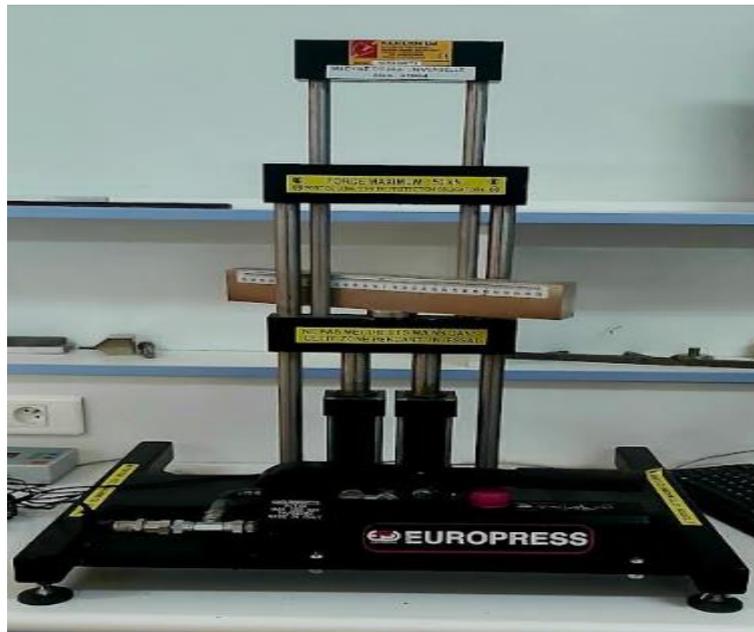


Figure 3.13: Appareil de flexion.

3.8.2 Résistance à la compression :

-Les échantillons récupérés après l'essai de flexion sont soumis à un autre essai de compression. Centrer chaque demi-prisme latéralement au plateau de la machine $\pm 0,5$ mm à l'aide d'un appareil contenant une zone d'application de 4 x 4 cm. La charge est ensuite appliquée progressivement à un rythme prévisible jusqu'à la rupture.

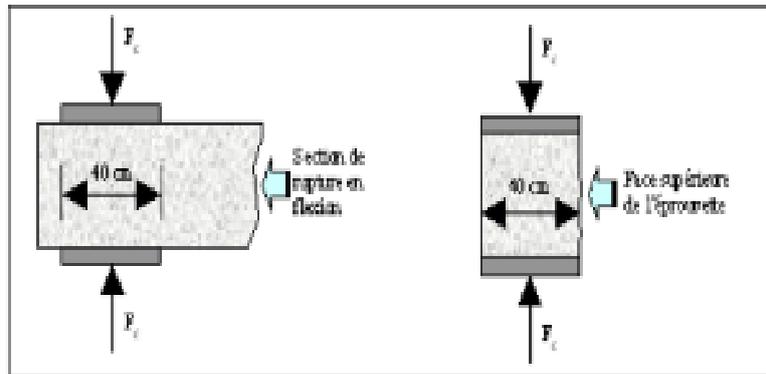


Figure 3.14: Schéma de l'essai de compression de l'éprouvette 4x4x16.

-La résistance en compression R_c (en N/mm²) est calculée au moyen de la formule :

$$R_c = \frac{F_c}{b^2}$$

-Avec :

- **R_c** : Résistance à la compression en (MPa).
- **F_c** : Charge de rupture en (N).
- **b** : Côte de l'éprouvette est égale à 40mm.

-La photo en dessous représente l'appareil de compression.

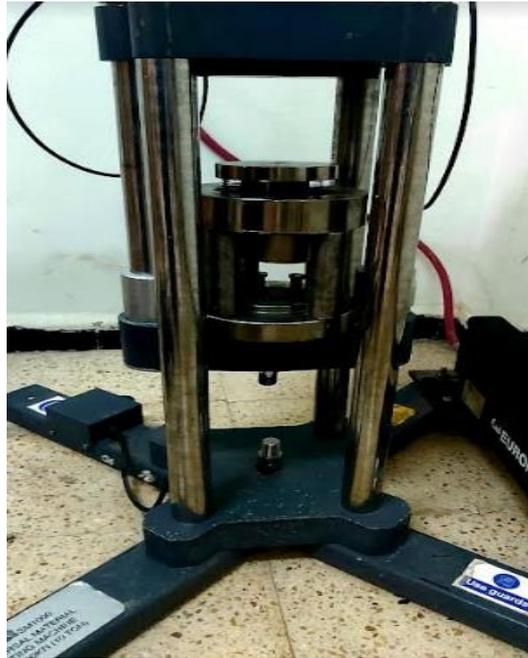


Figure 3.15 : Appareil de compression.

3.9 Conclusion :

-Dans ce chapitre ou cette partie expérimentale nous permis de maîtriser et réviser une bonne partie des essais qu'on a vu durant notre graduation : calculs de mélange et de composition, préparation du mortier, mélange, sélection du rapport de mélange et manipuler des essais mécaniques.

Chapitre IV :

Résultats et

discussion

4.1 Introduction :

-L'objectif de notre étude consiste à formuler un mortier romain, après avoir présenté les caractéristiques des matériaux utilisés, on va présenter et discuté les résultats de l'étude expérimentale obtenus à partir du programme d'essai.

-Dans ce travail nous avons étudié des essais non destructifs ainsi que les caractéristiques mécaniques des différents pourcentages de pouzzolane et de chaux dans ces formulations.

4.2 Résultats :

-Après la conservation des éprouvettes des différents pourcentages dans l'eau de mer pendant de 28 jours, nous avons procéder à faire des essais d'ultrason, conductivité thermique, absorption, traction par flexion et des essais de compression.

4.2.1 Essai ultrason :

-Les tableaux suivants représentent les résultats de l'essai ULTRASON :

Tableau 4.1: La vitesse de propagation des éprouvettes témoins.

Les éprouvettes	Le temps (ép) (μ s)	La vitesse (m/s)
MTEM	Ep1=9,44	4246,29m/s
	Ep2=9,40	
	Ep3=9,42	
MTEP	Ep1=8,94	4479,30m/s
	Ep2=8,95	
	Ep3=8,90	

- MTEM: Mortier témoin préparé par l'eau de mer.
- MTEP : Mortier témoin préparé par l'eau potable.

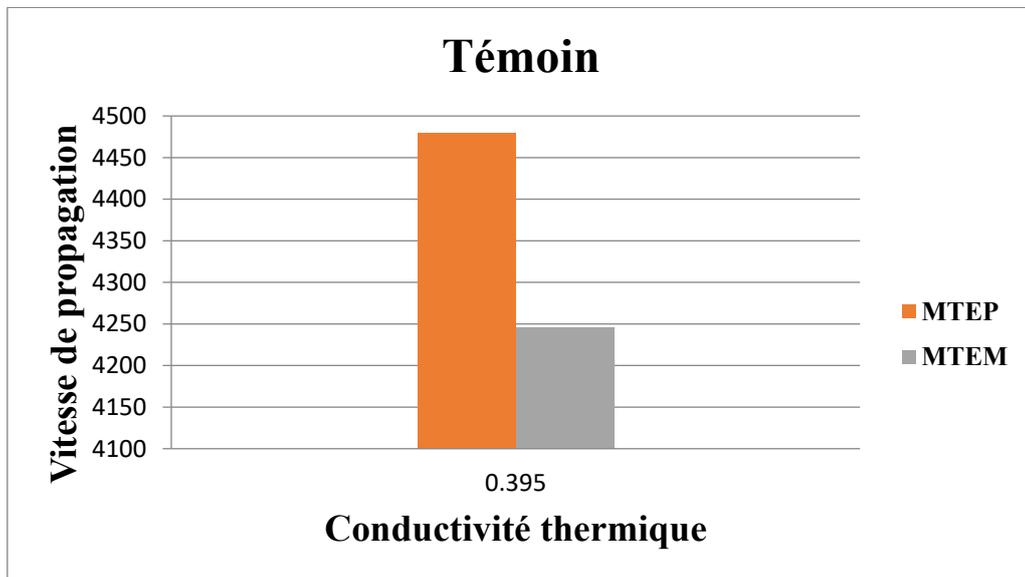


Figure 4.1 : Vitesse de propagation en fonction de conductivité thermique (témoin).

Tableau 4.2: La vitesse de propagation des différents pourcentages de pouzzolane.

Les éprouvettes	Le temps (μ s)	La vitesse (m/s)
PAEM	Ep1=16,9	2385,81m/s
	Ep2=16,8	
	Ep3=16,6	
PAEP	Ep1=33,9	1182,27m/s
	Ep2=33,9	
	Ep3=33,7	
PBEM	Ep1=28,9	1385,70m/s
	Ep2=29	
	Ep3=28,7	
PBEP	Ep1=31,94	1170,06m/s
	Ep2=31,8	

	Ep3=40	
PEEM	Ep1=40,9	977,99m/s
	Ep2=40,8	
	Ep3=41	
PEEP	Ep1=40,4	986,85m/s
	Ep2=40,4	
	Ep3=40,8	
PEEM (adj)	Ep1=40,4	990,91m/s
	Ep2=40,3	
	Ep3=40,4	
PE (fibre)	Ep1=16,4	2405,4m/s
	Ep2=17	
	Ep3=16,5	
PE (fibre+adj+gypse)	Ep1=18,9	2123,9m/s
	Ep2=18,8	
	Ep3=18,8	

- PAEM: Pourcentage A préparé par l'eau de mer.
- PAEP : Pourcentage A préparé par l'eau potable.
- PBEM: Pourcentage B préparé par l'eau de mer.
- PBEP : Pourcentage B préparé par l'eau potable.
- PEEM: Pourcentage E préparé par l'eau de mer.
- PEEP : Pourcentage E préparé par l'eau potable.

-Dans la littérature plusieurs modèles reliant la vitesse de propagation des ultrasons et la résistance mécanique en compression ont été établis pour estimer la résistance mécanique d'un matériau.

Dans notre cas on n'a utilisé que la vitesse mesuré au laboratoire.

On se référant au résultats obtenus des essais d'ultrason, on constate que le mortier fabriqué à base de la pouzzolane et de la chaux contient beaucoup de vide ce qui explique ces résultats obtenue

d'un point d'un autre point, vue l'âge des éprouvettes du mortier les réaction d'hydratation du béton ne sont pas terminés un résultats qui a été approuvés par plusieurs chercheurs qui ont démontré que la pouzzolane travail à long terme .

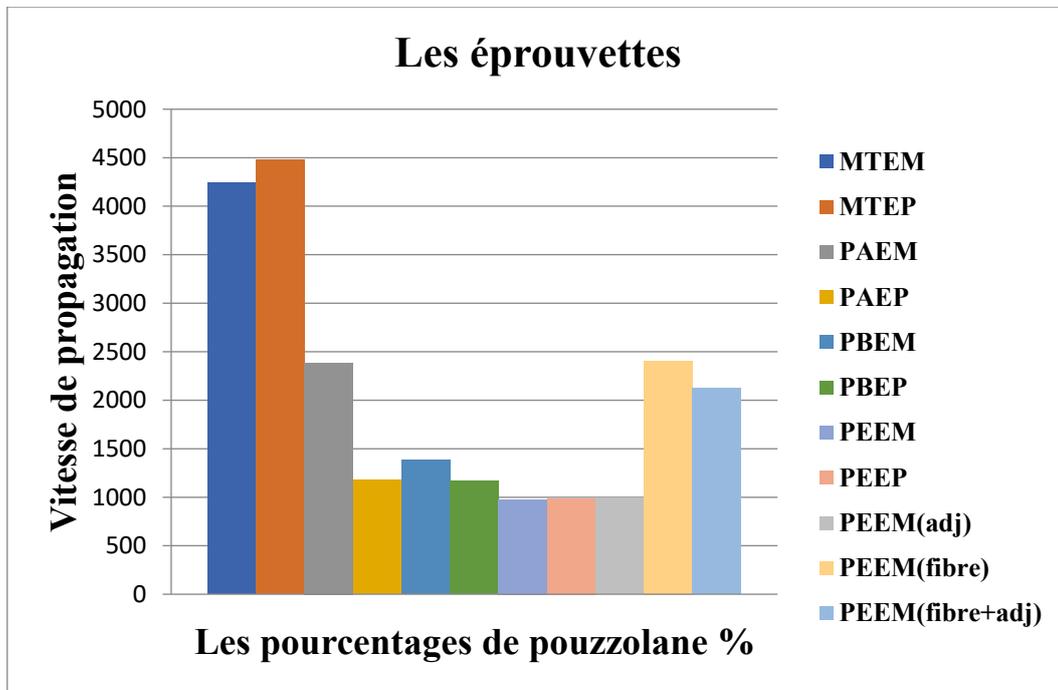


Figure 4.2 : Vitesse de propagation des mortiers a T=24°C.

Si on compare les résultats obtenue sur la figure 4.1 qui sont ceux du mortier témoin , avec la figure 4.2, on constate que la vitesse de propagation des ondes ultrason est nettement supérieure par rapport aux mortier romain ce qui s'explique par la densité du mortier témoin par rapport à celui du la pouzzolane et de chaux.

4.2.2 Essai d'absorption :

Tableau 4.3: Essai d'absorption d'eau.

Les éprouvettes	La durée				
	Masse sèche	5min	10min	18h	24h
TEM	273,3	273,7	273,7	275,4	282,74
TEP	303	304,4	304,4	304,6	304,7
PAEM	402,8	403,5	404,2	410	410,3
PAEP	327,9	328,7	340,3	360,1	360,2
PBEM	327,2	328,8	339,3	355	355
PBEP	420,7	421	425,2	440	440,5
PE (fibre+adj+gypse)	280,3	282,1	284,4	301,7	301,7
PE (fibre)	245,4	248	250	262,6	262,6

Tableau 4.4 : Coefficient d'absorption d'eau dans un temps différent.

Les Epreuves	Coefficient d'absorption d'eau			
	5min	10min	18h	24h
TEM	0,14	0,14	0,76	3,45
TEP	0,46	0,46	0,52	0,56
PAEM	0,17	0,35	1,78	1,86
PAEP	0,24	3,78	9,82	9,85
PBEM	0,48	3,69	7,63	8,49
PBEP	0,07	1,06	4,58	4,70
PE (fibre+adj+gypse)	0,64	1,46	7,63	7,63

PE (fibre)	1,05	1,87	7	7
------------	------	------	---	---

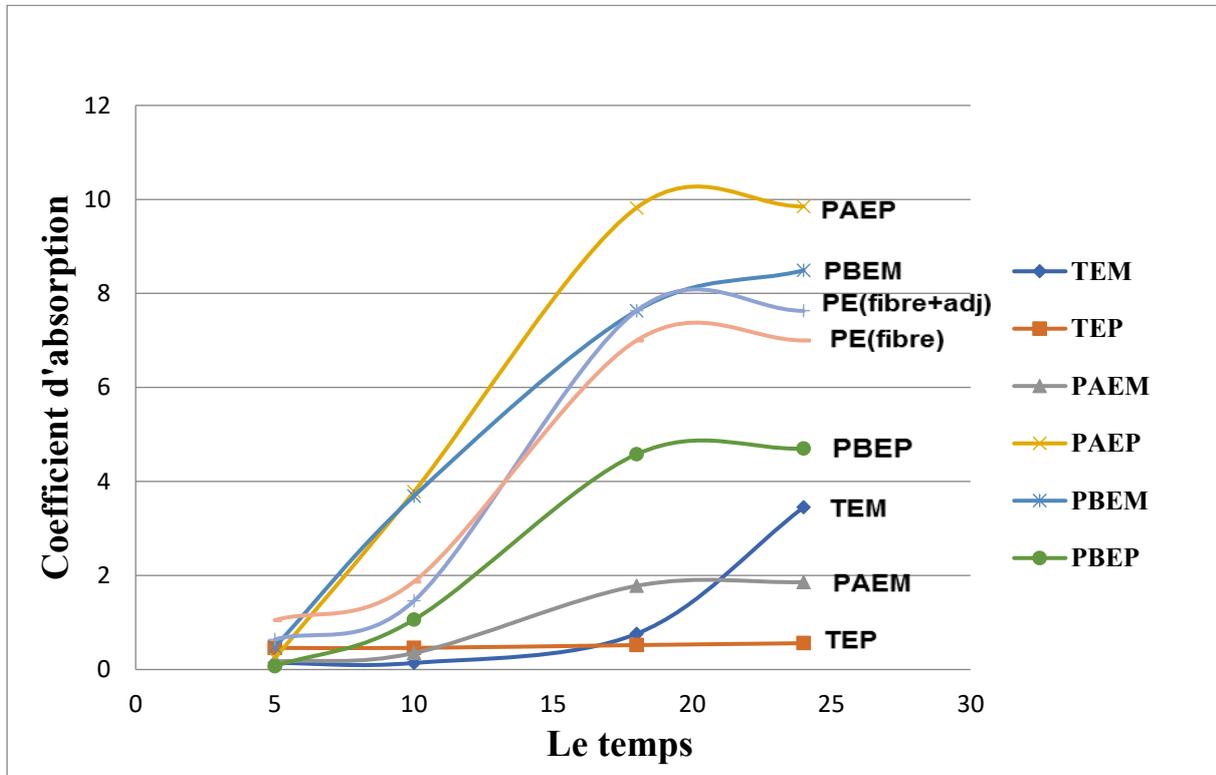


Figure 4.3 : Coefficient d'absorption des mortiers en fonction de temps.

Sur la figure 4.3 qui représente le coefficient d'absorption d'eau des différents mortiers étudiés, on constate une évolution du coefficient d'absorption en fonction du temps qui est plus importante pour le mortier (PAEP) que le mortier témoin (TEM). On remarque aussi que pour les mortiers (PAEM) et (TEM, TEP) le coefficient d'absorption est petit par rapport aux autres mortiers qui contiennent de la pouzzolane, ce qui s'explique sachant que la pouzzolane elle-même a un coefficient d'absorption qui est grand car elle contient beaucoup de vide.

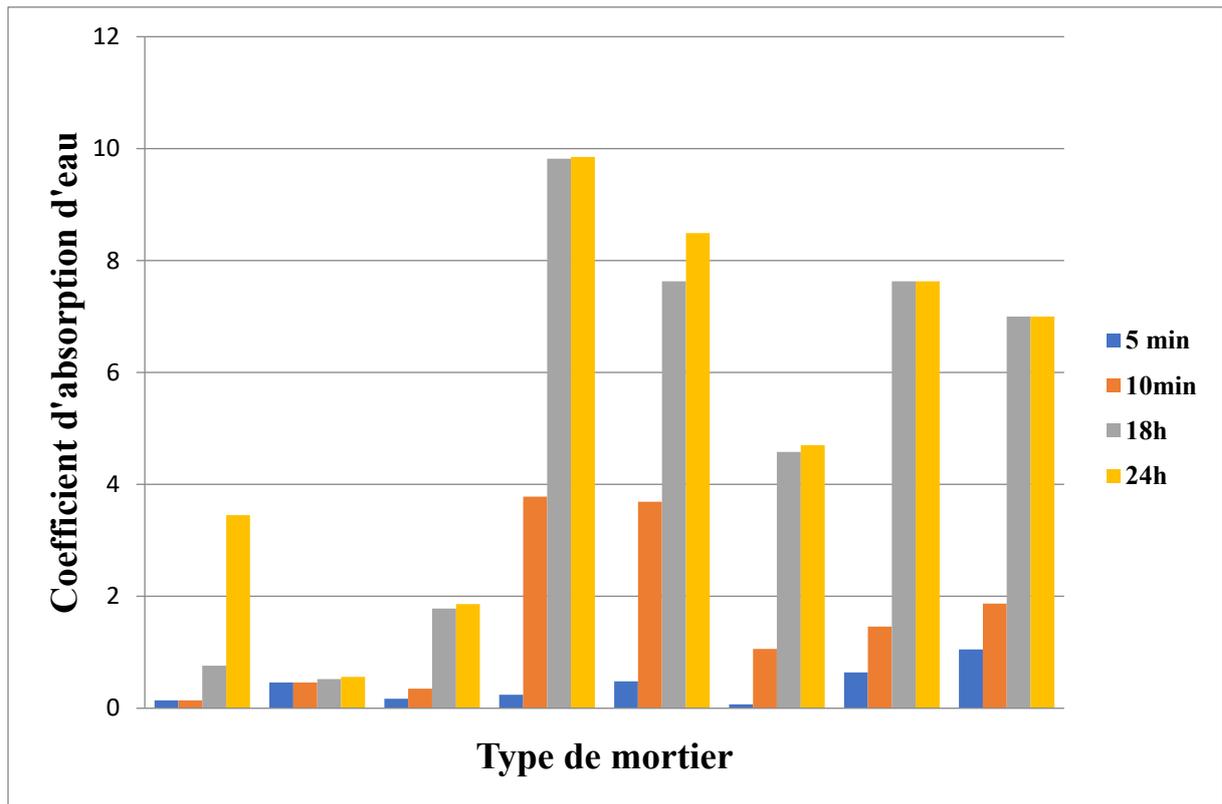


Figure 4.4 : Coefficient d'absorption des mortiers en fonction de Type de mortier

-Dans un premier temps, nous comparons les résultats entre le mortier témoin et notre nouveau mortier. Les résultats obtenus du mortier témoin sont considérés comme étant de bonne qualité. En ce qui concerne le mortier à base de pouzzolane, nous constatons qu'après un certain temps, il maintient sa masse et cesse d'absorber de l'eau, indiquant qu'il est saturé.

4.2.3 Essai conductivité thermique :

Tableau 4.5: Les résultats de conductivité thermique.

Les éprouvettes	K (w/m.k)	C (mj/m ³ .k)	D (mm ² /s)	R (c.cm/w)	T(°C)
MPEEM (fibre)	0,379	1,069	0,355	263,7	24,38
MPEEM(adj+fibre+gypse)	1,085	1,983	0,547	92,17	24,24
MTEM	0,418	1,332	0,280	239,5	26,5
MTEP	0,395	1,425	0,250	250,27	27,38

Avec :

K : Conductivité thermique.

C : Chaleur spécifique.

D : Diffusivité.

R : Résistivité.

T : La température.

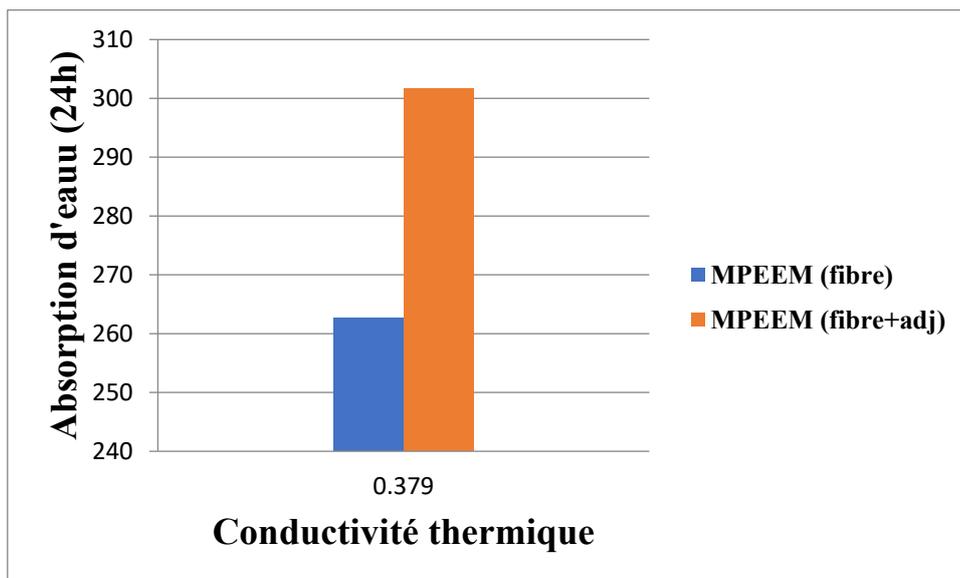


Figure 4.5 : Coefficient d'absorption d'eau en fonction de conductivité thermique (témoin).

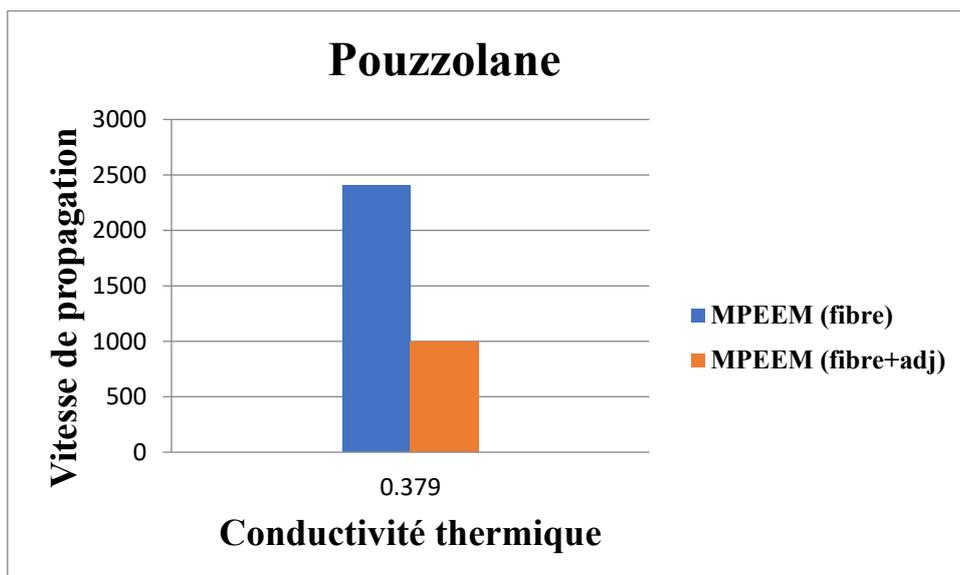


Figure 4.6 : Vitesse de propagation d'onde en fonction de conductivité thermique (pouzzolane).

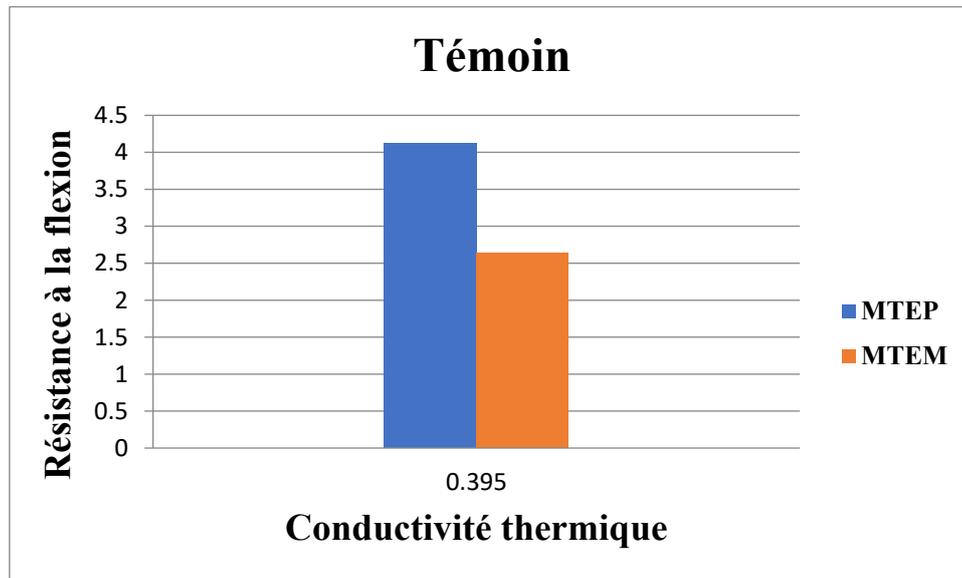


Figure 4.7 : Résistance à la flexion de témoin en fonction de conductivité thermique.

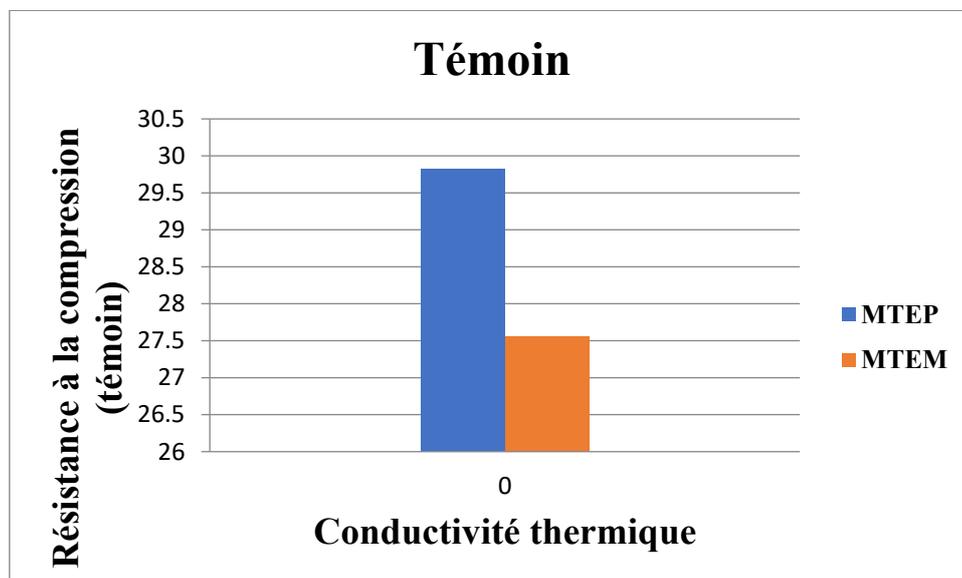


Figure 4.8 : Résistance à la compression de témoin en fonction de conductivité thermique.

Sur les figures 4.6 jusqu'à 4.9 on a essayé de comparer la conductivité thermique des différents mortiers avec les différents grandeurs physiques qu'on a mesuré à savoir le coefficient d'absorption, la vitesse de propagation d'onde ultrason et enfin avec les propriétés mécanique en particulier la résistance à la flexion et la résistance à la compression.

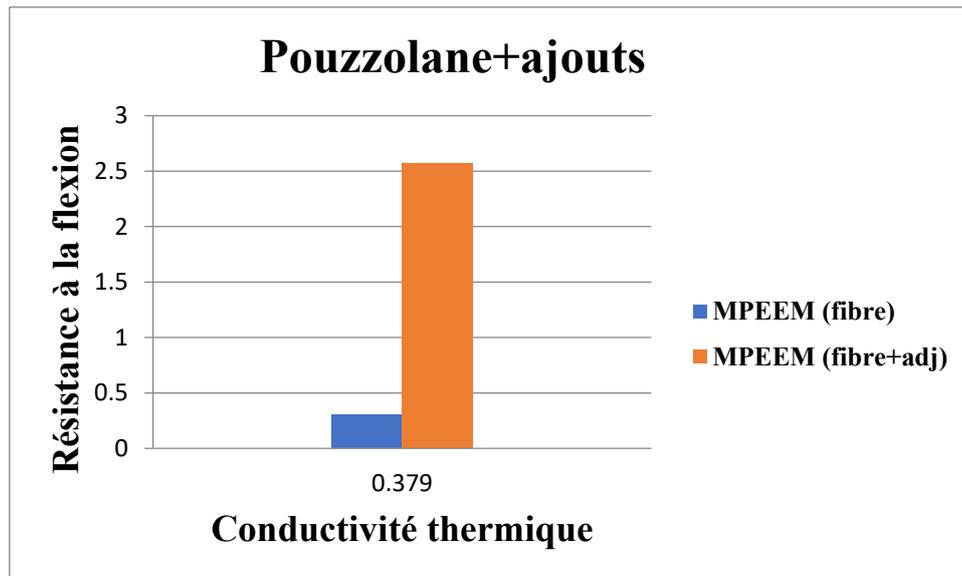


Figure 4.9 : Résistance à la flexion de pouzzolane et des ajouts en fonction de conductivité thermique.

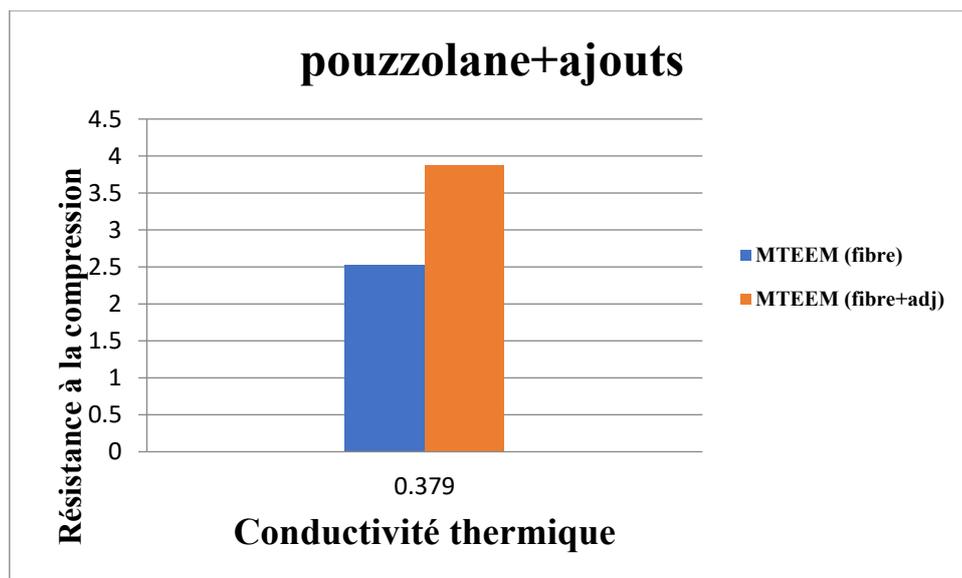


Figure 4.10 : Résistance à la compression de pouzzolane et des ajouts en fonction de conductivité thermique.

-D'après les résultats, nous remarquons que les mortiers à base de pouzzolane présentent des valeurs de chaleur spécifique, de conductivité et de résistivité presque similaires à celles du mortier témoin. Seul le mortier de pouzzolane contenant des fibres présente une résistivité inférieure.

4.2.4 Résistance à la flexion et compression :

4.2.4.1 Mortier ordinaire (témoin) :

-Les résultats des essais de flexion et de compression sur les éprouvettes des mortiers ordinaire témoin (MTEP et MTEM) sont montrés dans le tableau suivant :

Tableau 4.6 : Résultats des mortiers ordinaires après 28 jours.

Mortier	Force de flexion (KN)	Contrainte de flexion (MPA)	Force de compression (KN)	Contrainte de compression (MPA)
MTEP	1,76	4,12	47,73	29,83
MTEM	1,13	2,64	44,1	27,56

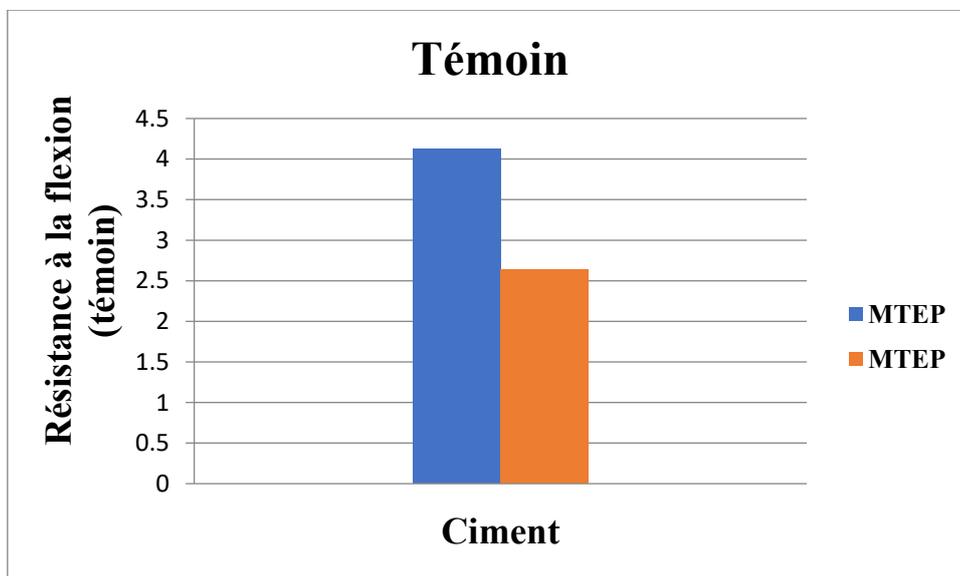


Figure 4.11 : Résistance à la flexion de témoin.

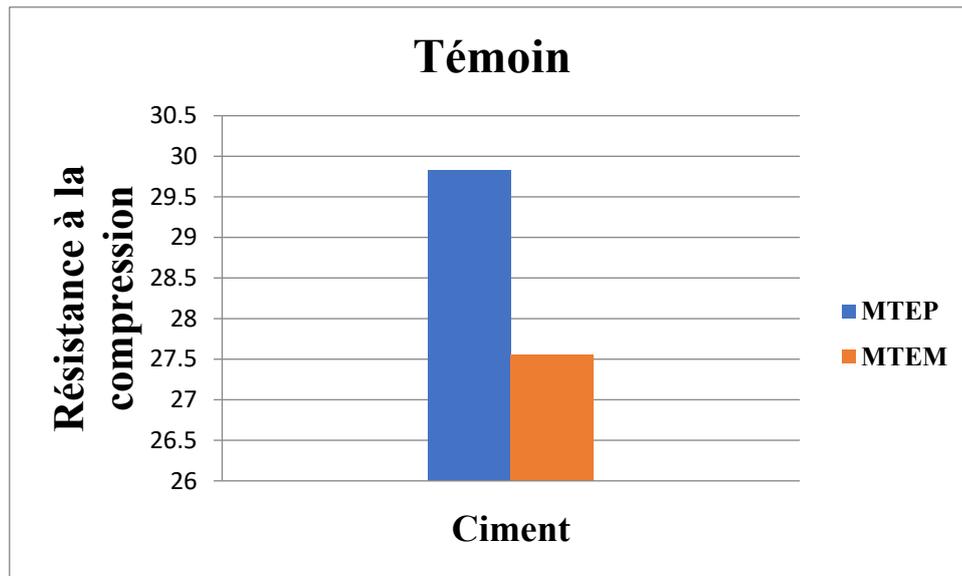


Figure 4.12 : Résistance à la compression de témoin.

-Nous avons observé que la contrainte de flexion du mortier ordinaire est meilleure avec de l'eau potable par rapport à l'eau de mer, et on peut dire la même chose avec la contrainte de compression du témoin préparé avec l'eau de mer par rapport à l'eau potable alors qu'elle est diminuée. Cela peut être expliqué par la présence des sels dans l'eau de mer qui affecte le mortier comme les sulfates qui produisent de l'étranglement secondaire un produit néfaste sur le mortier puisque il s'agit des éléments expansifs et solubles en présence d'eau qui vont créer des fissures et fragiliser le mortier.

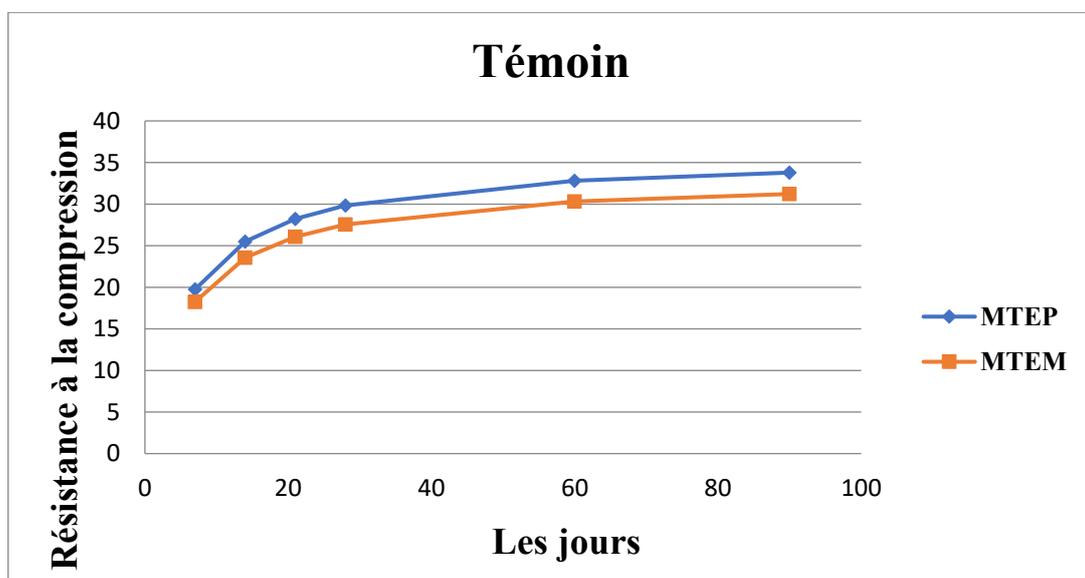


Figure 4.13 : Courbe de résistance à la compression de témoin en fonction de temps.

-Suites à des contraintes au niveau du laboratoire et suite aux aléas de l'expérimentales on n'a pu continuer nos expériences au-delà de 28 jours, ce qui nous a poussé à simuler la résistance en compression par une méthodes numérique pour mieux comprendre le comportement de nos mortiers et pouvoir comparer les résultats obtenus aux laboratoire.

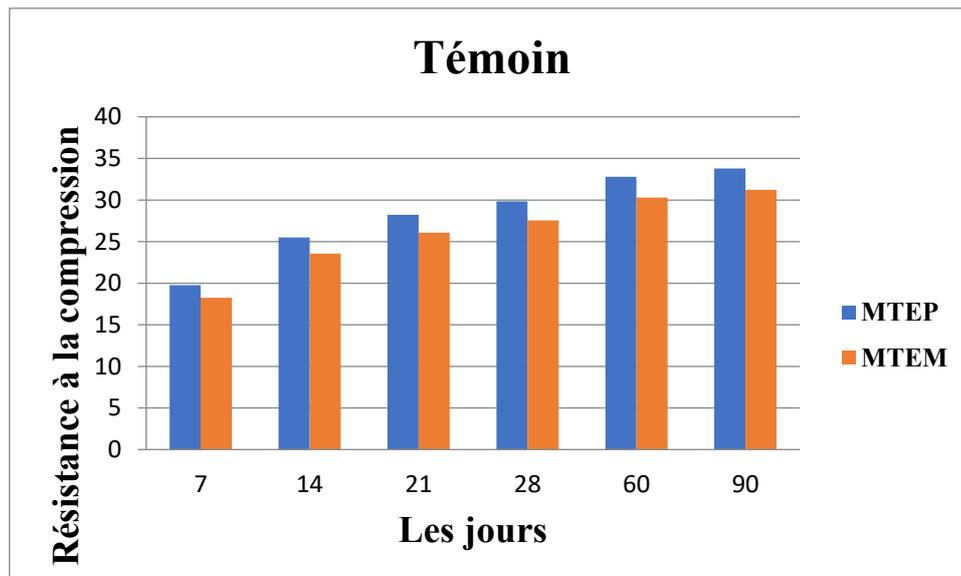


Figure 4.14 : Résistance à la compression de témoin en fonction de temps.

-On remarque toujours que le témoin avec l'eau potable mieux que l'eau de mer car L'eau de mer contient diverses substances qui peuvent réagir chimiquement avec les composants du ciment. L'une des principales raisons pour lesquelles le ciment ne résiste pas à l'eau de mer est la présence de chlorures dans l'eau. Les chlorures peuvent pénétrer dans la structure poreuse du béton et réagir avec les ions présents dans le ciment. Cette réaction chimique peut entraîner la corrosion des armatures métalliques présentes dans le béton, affaiblissant ainsi sa résistance.

De plus, l'eau de mer peut contenir des sulfates et d'autres sels qui peuvent également réagir avec les composants du ciment. Ces réactions chimiques peuvent provoquer un phénomène appelé "attaques sulfatiques", où des cristaux se forment à l'intérieur du béton, entraînant une expansion et des dommages structurels.

4.2.4.2 Mortier à base de pouzzolane :

-Les résultats des essais de flexion et de compression sur les éprouvettes des mortiers à base de pouzzolane sont montrés dans le tableau suivant :

- Tableau 1 : les éprouvettes conservées dans l'eau de mer.

➤ Tableau 2 : les éprouvettes conservées dans l'eau saturé en chaux.

Tableau 4.7 : Résultats des mortiers conservés dans l'eau de mer après 28 jours.

Mortier	Force de flexion(KN)	Contrainte de flexion (MPa)	Force de compression (KN)	Contrainte de compression (MPa)
PAEP	0	0	0	0
PAEM	0,2	0,46	2,7	1,68
PBEP	0,32	0,75	2,5	1,56
PBEM	0,6	1,41	2,5	1,56
PEEP	0,75	1,75	3,2	2
PEEM	0,9	2,10	4,87	3,04

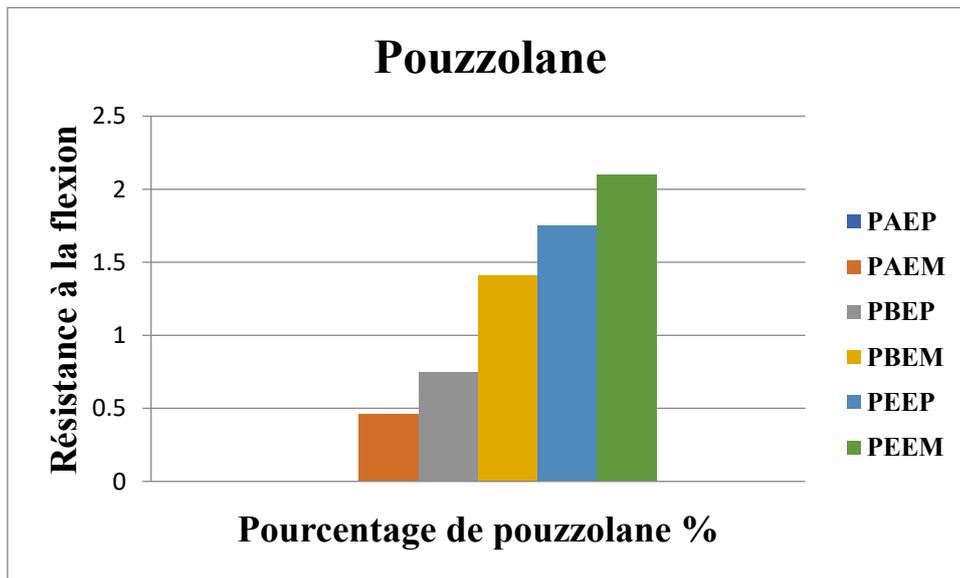


Figure 4.15 : Résistance à la flexion en fonction de pouzzolane.

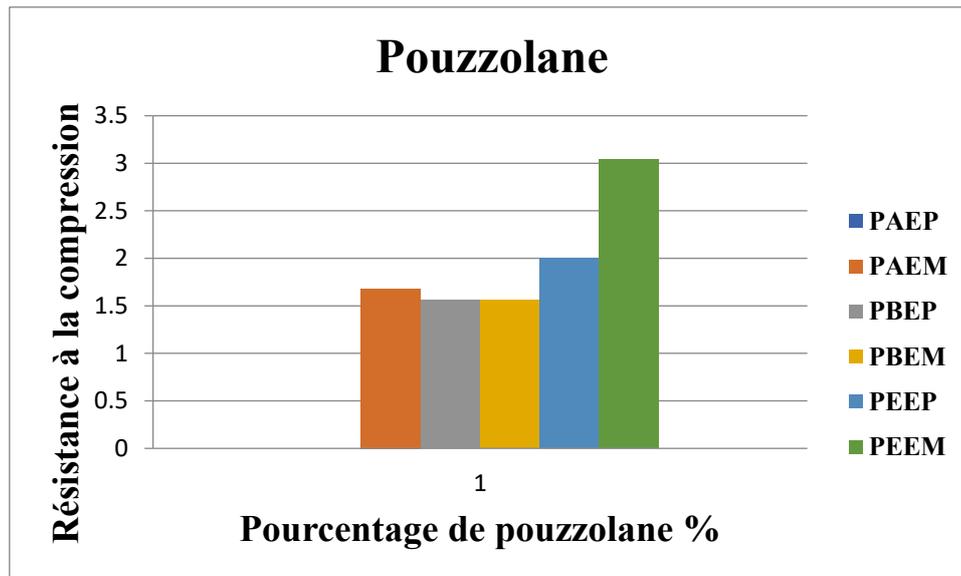


Figure 4.16 : Résistance à la compression en fonction de pouzzolane.

-Nous avons observé que chaque fois que le pourcentage de pouzzolane diminue, la résistance à la compression et la résistance à la flexion sont réduites.

-Les éprouvettes conservées dans l'eau de mer et l'eau saturée en chaux : la même chose

-Nous constatons que le premier pourcentage (A), qui comprend 90% de pouzzolane et 10% de chaux, présente une faible résistance, avec la majorité des éprouvettes qui se sont cassées.

-Nous avons également observé la même tendance pour le pourcentage (B), qui comprend 15% de chaux et 85% de pouzzolane, ainsi que pour les pourcentages (C) et (D). Par conséquent, nous avons réduit la quantité de pouzzolane dans le pourcentage (E) et ajouté des additifs tels que du gypse et des fibres.

-Nous avons constaté un changement significatif dans les résultats de la flexion et de la compression avec le pourcentage (E). De plus, nous avons obtenu de bons résultats de conductivité.

-Les meilleurs résultats ont été obtenus avec le pourcentage (E), qui contient 70% de pouzzolane, 30% de chaux, ainsi que 5% de gypse en tant qu'additif, et l'utilisation d'un adjuvant. Nous avons constaté que la modification du pourcentage de nos principaux constituants, la pouzzolane et la chaux, joue un rôle important dans la résistance du mortier.

-En raison de contraintes de temps, nous n'avons pas pu déterminer la composition exacte et les ratios appropriés utilisés dans l'ancienne méthode romaine.

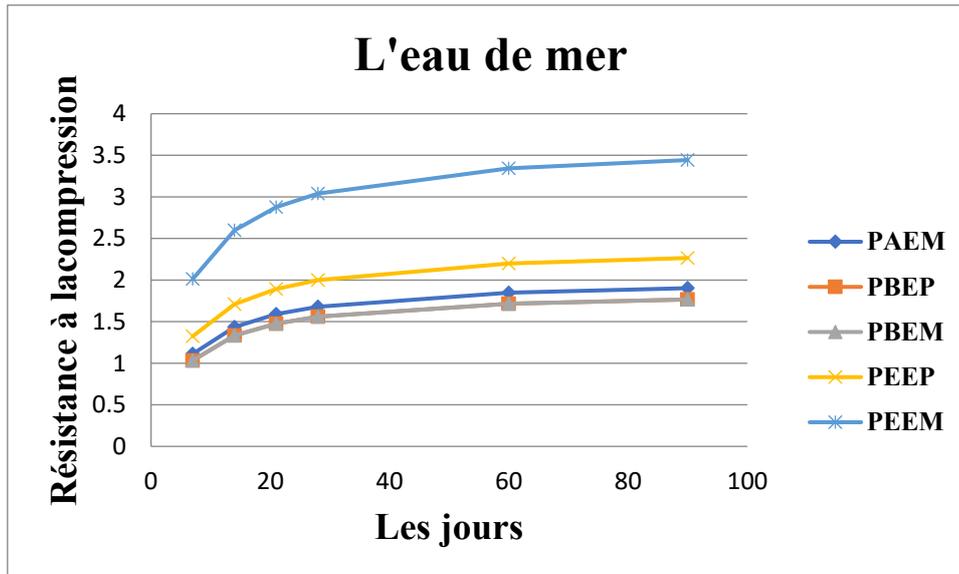


Figure 4.17: Courbe de résistance à la compression de pouzzolane en fonction de jours.

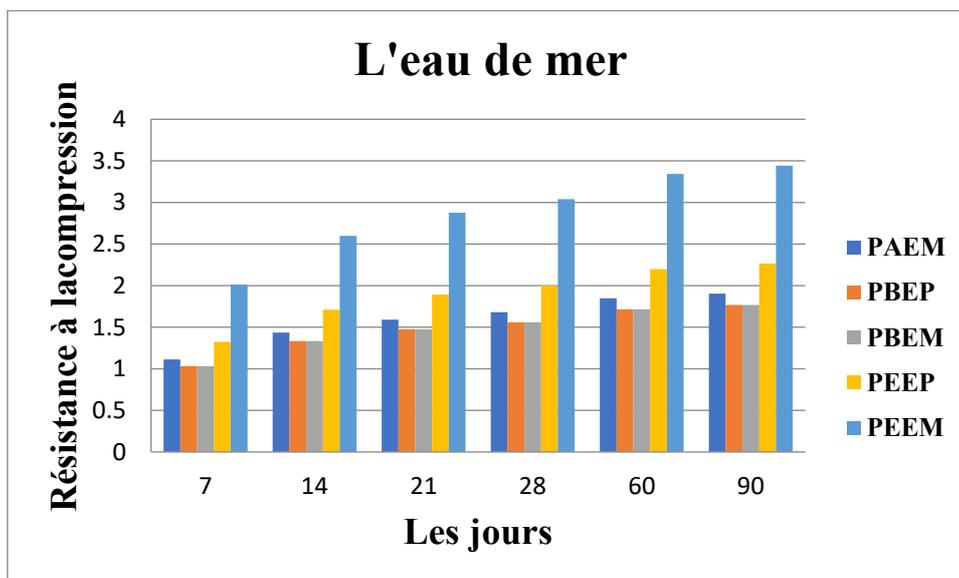


Figure 4.18: Résistance à la compression de pouzzolane en fonction de jours.

-Donc selon l’histogramme et la courbe au-dessus on remarque que plus la proportion de pouzzolane diminue, plus la résistance à la flexion et à la compression augmente.

Tableau 4.8 : Résultats des mortiers conservés dans l’eau saturé en chaux.

Mortier	Force de flexion(KN)	Contrainte de flexion (MPa)	Force de compression (KN)	Contrainte de compression (MPa)
PAEM	0	0	0	0
PEEP	0,33	0,77	3,32	2,07
PEEM	0,85	1,99	3,5	2,18

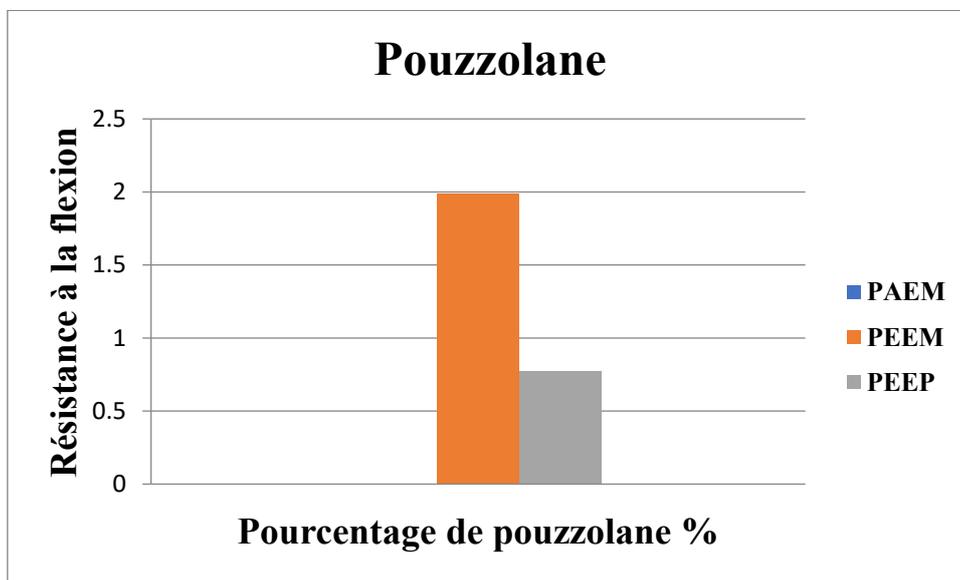


Figure 4.19 : Résistance à la flexion en fonction de pouzzolane.

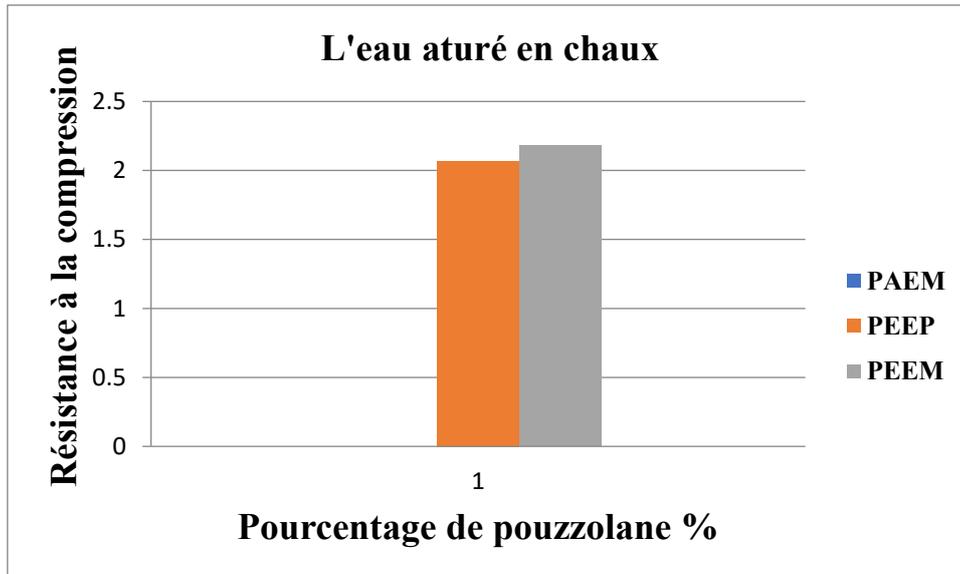


Figure 4.20 : Résistance à la compression en fonction de pouzzolane.

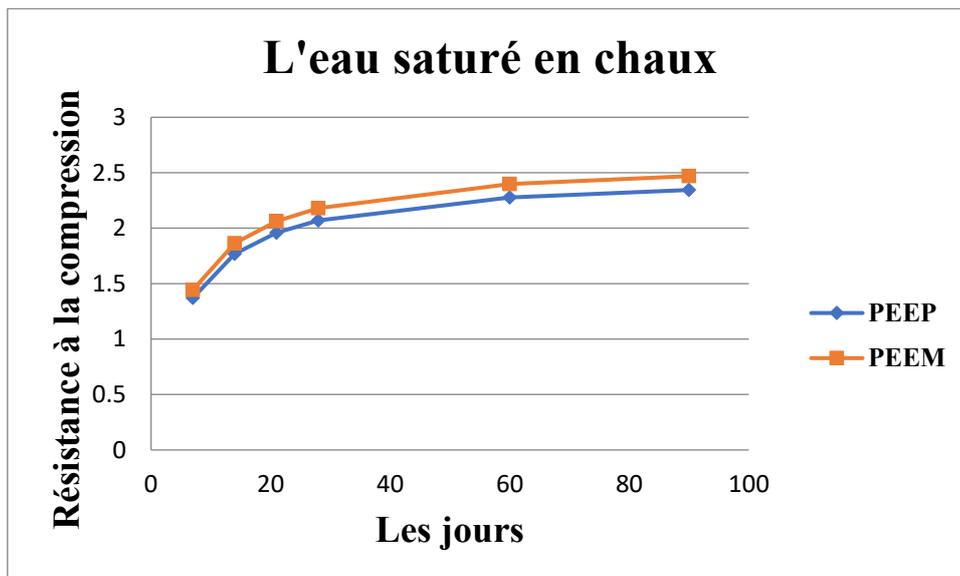


Figure 4.21 : Courbe de résistance à la compression de pouzzolane en fonction de jours.

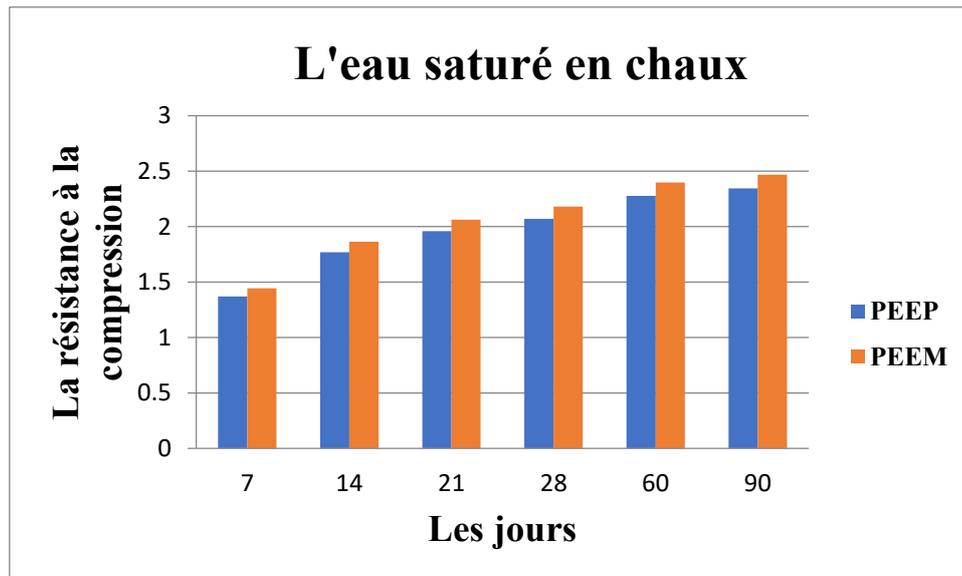


Figure 4.22 : Résistance à la compression de pouzzolane en fonction de jours.

-Les résultats des essais de flexion et de compression sur les éprouvettes des mortiers à base de pouzzolane et des fibres sont montrés dans le tableau suivant :

Tableau 4.9 : Résultats des mortiers avec des ajouts conservés dans l'eau de mer.

Mortier	Force de flexion(KN)	Contrainte de flexion (MPA)	Force de compression (KN)	Contrainte de compression (MPA)
PEEM(adj+fibre+gypse)	1,1	2,57	6,2	3,87
PEEM (fibre)	0,45	0,30	4,05	2,53

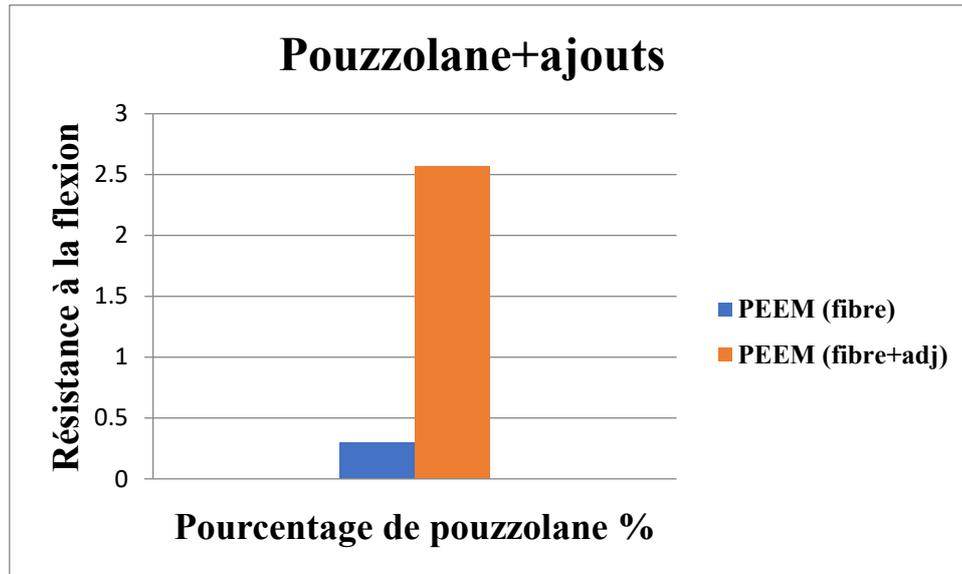


Figure 4.23 : Résistance à la flexion en fonction de pouzzolane et des ajouts.

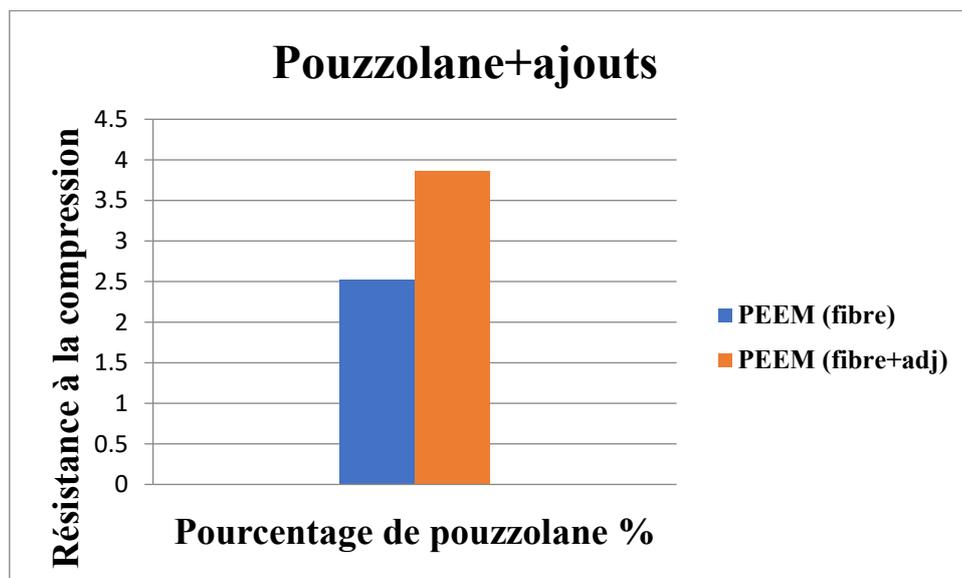


Figure 4.24: Résistance à la compression en fonction de pouzzolane et des ajouts.

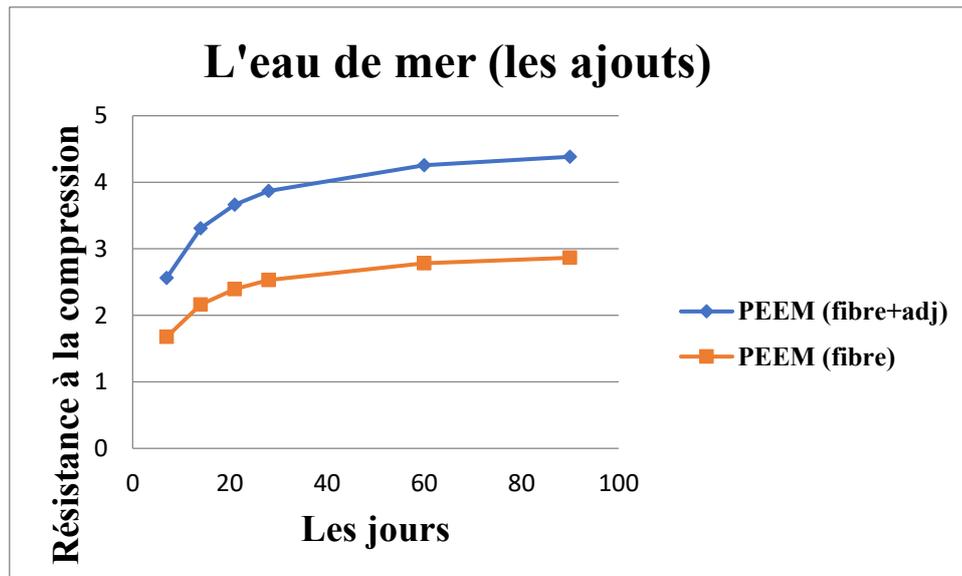


Figure 4.25 : Courbe de résistance à la compression de pouzzolane et des ajouts en fonction de jours.

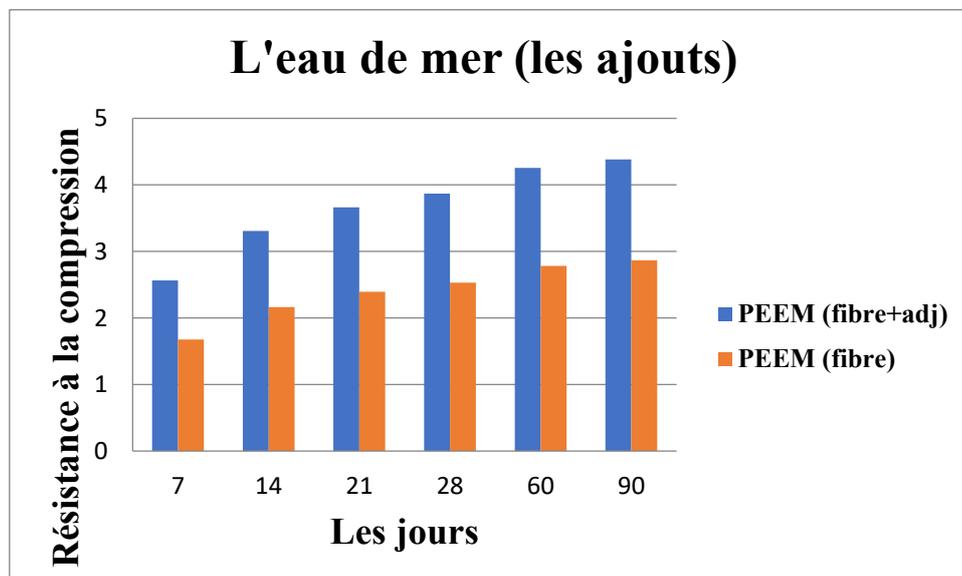


Figure 4.26: Résistance à la compression de pouzzolane et des ajouts en fonction de jours.

-Les courbes et les histogrammes au-dessus de la résistance à la compression en fonction des jours (7 j, 14 j, 21 j, 60j et 90 j) des témoins et pouzzolanes ne sont pas préparés et conservés comme les autres éprouvettes à l'âge de 28 jours par contre ils ont calculé avec une formule précise.

4.2.5 Discussion :

-Les éprouvettes de mortier sont conservées dans l'eau saturée en chaux et l'eau de mer à l'âge de 28 jours.

-Premièrement parle sur les éprouvettes de témoins, on remarque toujours que le témoin avec l'eau potable mieux que l'eau de mer car L'eau de mer contient diverses substances qui peuvent réagir chimiquement avec les composants du ciment. L'une des principales raisons pour lesquelles le ciment ne résiste pas à l'eau de mer est la présence de chlorures dans l'eau. Les chlorures peuvent pénétrer dans la structure poreuse du béton et réagir avec les ions présents dans le ciment. Cette réaction chimique peut entraîner la corrosion des armatures métalliques présentes dans le béton, affaiblissant ainsi sa résistance.

-De plus, l'eau de mer peut contenir des sulfates et d'autres sels qui peuvent également réagir avec les composants du ciment. Ces réactions chimiques peuvent provoquer un phénomène appelé "attaques sulfatiques", où des cristaux se forment à l'intérieur du béton, entraînant une expansion et des dommages structurels.

-Selon les résultats présentés dans la courbe de résistance à la compression de témoin en fonction de temps. Il est préférable de ne pas utiliser l'eau de mer pour le mélange du ciment car cela diminue la résistance de flexion et compression.

4.2.5.1 L'influence des différents pourcentages de pouzzolane :

-L'influence des différents pourcentages de pouzzolane peut avoir plusieurs effets sur les propriétés des matériaux de construction utilisés dans la confection de béton ou mortier et voici les résultats que nous avons obtenus :

-Nous avons observé que chaque fois que le pourcentage de pouzzolane diminue, la résistance à la compression et la résistance à la flexion sont réduites.

-Les éprouvettes conservées dans l'eau de mer et l'eau saturée en chaux : la même chose.

-Nous constatons que le premier pourcentage (A), qui comprend 90% de pouzzolane et 10% de chaux, présente une faible résistance, avec la majorité des éprouvettes qui se sont cassées.

-Nous avons également observé la même tendance pour le pourcentage (B), qui comprend 15% de chaux et 85% de pouzzolane, ainsi que pour les pourcentages (C) et (D). Par conséquent, nous avons réduit la quantité de pouzzolane dans le pourcentage (E) et ajouté des additifs tels que du gypse, d'adjuvant et des fibres.

-Nous avons constaté un changement significatif dans les résultats de la flexion et de la compression avec le pourcentage (E). De plus, nous avons obtenu de bons résultats de conductivité.

-Les meilleurs résultats ont été obtenus avec le pourcentage (E), qui contient 70% de pouzzolane, 30% de chaux, ainsi que 5% de gypse en tant qu'additif, et l'utilisation d'un adjuvant. Nous avons constaté que la modification du pourcentage de nos principaux constituants, la pouzzolane et la chaux, joue un rôle important dans la résistance du mortier.

-En raison de contraintes de temps, nous n'avons pas pu déterminer la composition exacte et les ratios appropriés utilisés dans l'ancienne méthode romaine.

-Donc selon l'histogramme et la courbe on remarque que plus la proportion de pouzzolane diminue, plus la résistance à la flexion et à la compression augmente.

4.2.6 Conclusion :

-Il est possible de s'inspirer des techniques des Romains pour la construction de nos maisons, mais reproduire exactement le même type de béton qu'ils utilisaient à l'époque est impossible. De plus, comme nous l'avons constaté, ce béton romain présente une résistance exceptionnelle uniquement lorsqu'il est en contact avec de l'eau de mer salée.

Conclusion générale

L'objectif principal de cette étude est de trouver le potentiel de remplacement du ciment, C'est-à-dire un matériau industriel par des matériaux naturels, car l'industrie du ciment émet de grandes quantités de dioxyde de carbone synergique (CO₂). Les matériaux alternatifs doivent être performants pour répondre aux exigences de construction spécifiques et être plus économique et protéger l'environnement.

C'est pour cela on a voulu changer dans notre étude des mortiers par des matériaux, ça veut dire on utilise la pouzzolane et la chaux avec des différents pourcentages plus les ajouts comme les fibres polypropylène et les adjuvants (plastifiant).

Suite à nos expérimentations, nous avons fait des découvertes intéressantes concernant les propriétés de la pouzzolane et de la chaux.

D'après notre étude et en se basant sur les essais qu'on a déjà réalisés on peut conclure les résultats comme suit :

Nous avons constaté que l'incorporation de pouzzolane et de chaux ne contribue pas à l'amélioration de la résistance du mortier à court terme.

Les résistances à la compression et à la traction diminuent considérablement lorsque le pourcentage de chaux est réduit.

La pouzzolane est un matériau qui absorbe une quantité significative d'eau pendant le processus de mélange. Cela est particulièrement notable avec un rapport E/C de 0,5, où la pouzzolane a tendance à retenir une quantité importante d'eau lors du gâchage.

Le composite contenant de la pouzzolane présente une capacité d'absorption inférieure à celle du mortier témoin, ainsi qu'une porosité importante.

La résistivité augmente en ajoutant les fibres et l'adjuvant.

L'utilisation de la pouzzolane avec de l'eau de mer peut donner des résultats satisfaisants et les ajouts comme le gypse.

La diminution de résistance peut être attribuée à l'effet du pourcentage, notamment dans le cas où le pourcentage de chaux est réduit.

Perspective :

À la lumière des informations précédentes, nous tirons la conclusion que l'incorporation de pouzzolane et de chaux en remplacement du ciment dans le béton peut contribuer à améliorer les performances d'un béton, en particulier lors de la construction d'ouvrages nécessitant l'utilisation de béton léger. Dans les futures recherches, il est prévu d'explorer d'autres pourcentages afin d'améliorer notre béton et de percer les véritables secrets du ciment romain.

Références bibliographiques

- [1] « Le Béton Romain et ses insaisissables secrets 2023 », 11 avril 2019. <https://faisons-le-mur.com/le-beton-romain-et-ses-insaisissables-secrets/> (consulté le 24 février 2023).
- [2] L. Rédaction, « Comment l'eau de mer renforce-t-elle le béton romain ? », 4 juillet 2017. <https://actualite.housseniawriting.com/science/archeologie/2017/07/04/comment-leau-de-mer-renforce-t-elle-le-beton-romain/22543/> (consulté le 18 février 2023).
- [3] « The History of Concrete ». <https://www.nachi.org/history-of-concrete.htm> (consulté le 22 février 2023).
- [4] « Panthéon de Rome », *Rome-Roma*. <https://www.rome-roma.net/pantheon-de-rome/> (consulté le 24 février 2023).
- [5] « Audioguide FORUM ROMAIN Guide Touristique », *MyWoWo*. <https://mywowo.net/fr/italie/rome/forum-romain> (consulté le 24 février 2023).
- [6] « Timgad - LAROUSSE ». <https://www.larousse.fr/encyclopedie/ville/Timgad/146812> (consulté le 5 juin 2023).
- [7] « Roman Concrete vs. Modern Concrete | Kilgore Companies », *Kilgore Companies | Enter Tagline Here*, 26 août 2022. <https://www.kilgorecompanies.com/roman-concrete-vs-modern-concrete/> (consulté le 4 mars 2023).
- [8] « Béton Romain ». <https://www.vita-romae.com/beton-romain.html> (consulté le 4 mars 2023).
- [9] Luc, « Le secret du mortier Romain découvert. Chaux pouzzolane et eau de mer. », *Patrimoine Façades*, 11 novembre 2013. <https://blog-patrimoine-facades.com/le-mortier-romain/> (consulté le 4 mars 2023).
- [10] <https://www.facebook.com/jacquelinedecharpentier>, « Comment l'eau de mer renforce-t-elle le béton romain ? », 4 juillet 2017. <https://actualite.housseniawriting.com/science/archeologie/2017/07/04/comment-leau-de-mer-renforce-t-elle-le-beton-romain/22543/> (consulté le 24 mai 2023).
- [11] « Si l'on s'inspirait des romains pour la construction de nos maisons ? », *Qualiblu*, 26 mars 2018. <https://qualiblu.com/blog/si-lon-sinspirait-des-romains-pour-la-construction-de-nos-maisons/> (consulté le 8 juin 2023).
- [12] N. Mayer, « On sait (enfin) pourquoi le béton des Romains est aussi résistant », *Futura*. <https://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/chimie-on-sait-enfin-beton-romains-aussi-resistant-67855/> (consulté le 4 juin 2023).
- [13] « Fontaine de Trevi | Histoire + Conseils visite | Rome 2023 », *Voyage Tips*, 27 mars 2023. <https://www.voyagetips.com/fontaine-de-trevi/> (consulté le 5 juin 2023).
- [14] « Les aqueducs romains : des chefs-d'œuvre techniques ». <https://www.jw.org/fr/biblioth%C3%A8que/revues/g201411/les-aqueducs-romains/> (consulté le 5 juin 2023).

- [15] « Roman Concrete Construction Development & Uses | How Did the Romans Make Concrete? - Video & Lesson Transcript », *study.com*. <https://study.com/learn/lesson/roman-concrete-construction-development-uses.html> (consulté le 27 mai 2023).
- [16] « How seawater strengthens ancient Roman concrete | UNews ». <https://unews.utah.edu/roman-concrete/> (consulté le 27 mai 2023).
- [17] « Porosité des matériaux », *Energie Plus Le Site*, 25 septembre 2007. <https://energieplus-lesite.be/theories/enveloppe9/comportement-des-materiaux4/porosite-des-materiaux/> (consulté le 19 mai 2023).
- [18] « CEM II 42.5N et CEM II 42.5R », *Groupe Industriel des Ciments d'Algérie*. <https://www.gica.dz/cem-ii-42-5n-et-cem-ii-42-5r/> (consulté le 19 mai 2023).
- [19] « TP 3 M.D.C. L'équivalent de Sable | PDF | Matériaux de construction | Chimie », *Scribd*. <https://fr.scribd.com/doc/145099174/tp-3-m-d-c-l-equivalent-de-sable> (consulté le 17 mai 2023).